

Haziran'21
June'21

Sayı/Number: 21 Cilt/Volume: 11
Yıl/Year: 2021

Yayın Sahibi

TMMOB
Elektrik Mühendisleri Odası Adına
Bülent PALA

Sorumlu Yazı İşleri Müdürü

Can İNCEBİYİK

Yayın İdare Merkezi

Ihlamur Sokak No:10 Kat:3
Kızılay - Ankara
Tel: (312) 425 32 72
Faks: (312) 417 38 18
<http://bilimseldergi.emo.org.tr>
bilimseldergi@emo.org.tr
EMO Üyelerine parasız dağıtılır

Dergi Koordinatörü

Oylum YILDIR
oylum.yildir@emo.org.tr

Yayın Türü

Yerel Süreli Yayın
6 ayda bir yayınlanır

Basım Adedi

500

Basım Tarihi

Aralık 2021

Sayfa Düzeni

PLAR

Planlama Yayıncılık Reklamcılık
Turizm İnşaat Tic. Ltd. Şti.
Yüksel Cad. No: 35/12 Yenışehir-Ankara
Tel: (0.312) 432 01 83-93 Faks: (0.312)
432 54 22
e-posta: plarltd@gmail.com

EMO BİLİMSEL DERGİ

Elektrik, Elektronik, Bilgisayar, Biyomedikal
Mühendisliği Bilimsel Dergisi

The Journal of Electrical, Electronics, Computer and
Biomedical Engineering

YAYIN KURULU

BAŞ EDİTÖR/EDITOR IN CHIEF

Prof. Dr. Timur Aydemir

EDİTÖRLER/EDITORIAL BOARD

Prof. Dr. Arif Nacaroğlu

Prof. Dr. Erhan Akın

Prof. Dr. Güven Önbilgin

Prof. Dr. H. Altay Güvenir

Doç. Dr. Özlem Özgün



TMMOB

Elektrik Mühendisleri Odası

UCTEA/Chamber of Electrical Engineers

EMO Bilimsel Dergi Danışma Kurulu

Prof. Dr. A. Hamit Serbest	Çukurova Üniversitesi
Prof. Dr. Altay Güvenir	Bilken Üniversitesi
Prof. Dr. Cengizhan Öztürk	Boğaziçi Üniversitesi
Prof. Dr. Erhan Akın	Fırat Üniversitesi
Prof. Dr. Güven Önbilgin	Ondokuz Mayıs Üniversitesi
Prof. Dr. Murat Eyüboğlu	Orta Doğu Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Timur Aydemir	Gazi Üniversitesi
Prof. Dr. Ali Hikmet Doğru	Orta Doğu Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Arif Nacaroglu	Gaziantep Üniversitesi
Prof. Dr. Atilla Bir	İstanbul Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Aydın Köksal	Bilişim A.Ş.
Prof. Dr. Aydoğan Özdemir	İstanbul Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Aysin Baytan Ertüzün	Boğaziçi Üniversitesi
Prof. Dr. Belgin Türkay	İstanbul Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Bülent Sankur	Boğaziçi Üniversitesi
Prof. Dr. Cüneyt Güzeliş	Yaşar Üniversitesi
Prof. Dr. Erdal Panayırıcı	Kadir Has Üniversitesi
Prof. Dr. Erkan Afacan	Gazi Üniversitesi
Prof. Dr. Ferit Acar Savacı	İzmir İleri Teknoloji Enstitüsü
Prof. Dr. H. Bülent Ertan	Atılım Üniversitesi
Prof. Dr. Haldun Karaca	Dokuz Eylül Üniversitesi
Prof. Dr. İbrahim Eksin	İstanbul Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. İnci Çilesiz	İstanbul Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. İrfan Karagöz	Gazi Üniversitesi
Prof. Dr. İsmail Hakkı Altaş	Karadeniz Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. İsmail Hakkı Çavdar	Karadeniz Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Kemal Leblebicioğlu	Orta Doğu Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Lale Tükenmez Ergene	İstanbul Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Mithat İdemen	İstanbul Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Muhittin Gökmen	MEF Üniversitesi
Prof. Dr. Murat Aşkar	İzmir Ekonomi Üniversitesi
Prof. Dr. Müjde Güzelkaya	İstanbul Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Osman Eroğul	TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi
Prof. Dr. Oya Kalıpsız	Yıldız Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Özlem Özgün	Hacettepe Üniversitesi
Prof. Dr. Sermin Onaygil	İstanbul Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Tayfun Akgül	İstanbul Teknik Üniversitesi
Doç. Dr. Ahmet Koltuksuz	Yaşar Üniversitesi
Doç. Dr. Osman Abul	TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi
Bora Güngören	Portakal Teknoloji
Fikret Küçükdeveci	TEPA
Hasan Ali Pazar	Siemens

İÇİNDEKİLER/CONTENTS

Mikrodalga Dielektrik Spektroskopisi ile Sert ve Yumuşak Doku Karakterizasyonunun Ön İncelenmesi Preliminary Investigation of Hard and Soft Tissue Characterization with Microwave Dielectric Spectroscopy <i>Seda KESKİN, Tuba YILMAZ, Tayfun AKGÜL</i>	7
Büyük Ölçekli Fotovoltaik Santrallerde Aktif Güç Kontrol Yöntemlerinin Frekans Kararlılığı Analizi Frequency Stability Analysis of Active Power Control Methods in Large-Scale Photovoltaic Plants <i>Bora ÇAVDAR, Ömür AKYAZI, Erdiç ŞAHİN, Fatih Mehmet NUROĞLU</i>	17
Türkiye’de Kullanılan Yenilenebilir Enerji Sertifika Sistemlerinin Değerlendirilmesi Evaluation of Renewable Energy Certificate Schemes in Turkey <i>Mustafa ÖZCAN, Burcu ERGÜN, Elif OCAKLI</i>	29
Dijital Kontrollü Yumuşak Mod Geçişli Dört Anahtarlı Bir Alçaltıcı-Yükseltici Çevirici Tasarımı Design of a Digitally Controlled Four-Switch Buck-Boost Converter with Smooth Mode Transition <i>Burak ÇAYKENARI, Bünyamin TAMYÜREK</i>	43
Mobil Sağlık Uygulamalarına Genel Bir Bakış ve Özgün Bir Mobil Sağlık Uygulaması Geliştirilmesi An Overview of Mobile Health Applications and Development of an Original Mobile Health Application <i>Mustafa DEĞERLİ</i>	59
Geliştirilmiş Atom Arama Optimizasyon Algoritması ile Çok Katmanlı Algılayıcı Eğitimi A Novel Improved Atom Search Optimization Algorithm for Training Multilayer Perceptron <i>Davut İZCİ</i>	71
Ters-Paralel Bağlı Schottky Diyot Dizisi Tabanlı Van der Pol Osilatörü Devresinin Modellenmesi ve LTspice ve Simulink Kullanarak Analizi Modeling an Anti-Parallel-Connected Schottky Diode String-Based Van der Pol Oscillator Circuit and its Analysis Using LTspice and Simulink <i>Kübra ÇAKIR, Reşat MUTLU, Ertuğrul KARAKULAK</i>	81
Simulink Üzerinden Medikal Yardımcı Açık Kaynak Robot Kolun İleri ve Ters Kinematik Analizinin Simülasyonu Simulation of the Forward and Inverse Kinematic Analysis of Medical Assistant Open-Source Robot Arm via Simulink <i>Mehmet GÜL</i>	93
Yüksek Gerilim Kablo Sistemleri için Arıza Erken Uyarı Sistemli Yeni Nesil Ekran Bağlantı Kutusu Geliştirilmesi Development of a New Generation Intelligent Link Box (iLinkBox™) with Early Warning System for High Voltage Cable System <i>Sadettin ERDENİZ, Abdollatif BASHGHAREH, Colin SMITH</i>	101
Covid-19 Sürecinin Enerji Tüketim Alışkanlıklarına Etkileri: Kahramanmaraş Örneği Effects of Covid-19 Process on Energy Consumption Habits: The Case of Kahramanmaraş <i>Hasan BEYHAN, Gizem EREN, Fatma AVLİ FİRİŞ</i>	107

Mikrodalga Dielektrik Spektroskopi ile Sert ve Yumuşak Doku Karakterizasyonunun Ön İncelenmesi

Preliminary Investigation of Hard and Soft Tissue Characterization with Microwave Dielectric Spectroscopy

Seda Keskin¹, Tuba Yılmaz¹, Tayfun Akgül¹



¹Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü
İstanbul Teknik Üniversitesi

keskins19@itu.edu.tr, tuba.yilmaz@itu.edu.tr, tayfunakgul@itu.edu.tr

Özet

Mikrodalga frekanslarında sert ve yumuşak dokular arasındaki dielektrik özellik farkı yumuşak dokuların sert dokulardan ayrılması için kullanılabilir potansiyeline sahiptir. Biyolojik dokuların mikrodalga frekanslarda dielektrik özellikleri geleneksel olarak açık uçlu koaksiyel prob tekniği ile ölçülür. Bununla birlikte, doku heterojenitesi, kullanıcı hataları, matematiksel yaklaşım ve kalibrasyon bozulması nedeniyle kullanılan teknik yüksek hata oranlarına sahiptir. Farklı değerlere sahip veri gruplarına makine öğrenimi algoritması uygulandığında verinin yüksek doğrulukta sınıflandırılacağı bilinmektedir. Bu nedenle, tekniğe özgü hatalardan en az etkilenebilecek bir sınıflandırma parametresinin seçilmesi, doku kategorizasyonunun doğruluğunu artırmak için kritik öneme sahiptir. Empirik olarak, mikrodalga frekanslarındaki dielektrik özellikler güç yasasına uyar. Bu olguya göre daha önce araştırılmamış bir parametre, dielektrik özelliklerden elde edilebilecek güç parametresidir. Bu kapsamda güç parametresinin farklı dokuları, özellikle sert ve yumuşak dokuları, ayırabilme potansiyeli bu çalışmada literatürde verilmiş olan veri gruplarından yola çıkarak araştırılmıştır. Ayrıca güç parametresinin etkinliğini araştırmak amaçlı sağlıklı ve kanserli karaciğer dokularına ait dielektrik özellik ölçümlerine ait güç parametreleri kullanılarak makine öğrenme algoritmalarıyla sınıflandırma yapılmıştır. Uygulanan teknik sonucu %82 doğruluk elde edilmiştir. Bu kapsamda güç parametresinin doku sınıflandırılmasında dielektrik özelliklere ek olarak farklı bilgi barındıran bir özellik olarak kullanılabilirliği öngörülmektedir. Alternatif olarak, bazı durumlarda dielektrik özellikler yeterli bilgi sağlamaz, bir örnek sert ve yumuşak dokuların ayrılmasıdır, bu koşullar altında güç parametresi sınıflandırma amacıyla kullanılabilir. Bu yaklaşım yüksek maliyetli görüntüleme veya mutasyon tarama testlerine alternatif bir hızlı tanı yöntemi olarak kullanılabilir.

Anahtar Kelimeler: Mikrodalga dielektrik özellikler, Cole-Cole denklemi, Güç yasası, Mikrodalga teşhis.

Abstract

The dielectric property discrepancy between hard and soft tissues at microwave frequencies can potentially be utilized for the separation of these tissues from one another. Microwave dielectric properties of biological tissues are traditionally measured with the open-ended coaxial probe technique. However, the technique suffers from high error rates due to tissue heterogeneity, user errors, mathematical approach and calibration degradation. It is known that datasets with different values can be classified with high accuracy when a machine learning algorithm is applied. Therefore, choosing a classification parameter that can be least affected by inherent errors is critical for increasing the accuracy of tissue categorization. Empirically, dielectric properties at microwave frequencies abide by the power law. Based on this fact, one unexplored parameter is the power parameter which can be derived from the dielectric properties. To this end, this work presents investigations on the potential use of the power parameter to separate different tissues, specifically hard and soft tissues, based on the datasets available in the literature. Additionally, in order to investigate the effectiveness of the power parameter, classification was performed with machine learning algorithms using the power parameters obtained from dielectric property measurements of healthy and malignant liver tissues. Through the application of the technique 82% accuracy was obtained. Towards this goal, it is predicted that the power parameter can be used as a feature containing different information in addition to dielectric properties in tissue classification. Alternatively, in some cases dielectric properties do not provide enough information, one example is the separation of hard and soft tissues, under such conditions the power parameter can be employed for classification purposes. This approach can possibly be used as an alternative rapid diagnostic method to highcost imaging or mutation screening tests.

Keywords: Microwave dielectric properties, Cole-Cole equation, Power law, Microwave diagnostics.

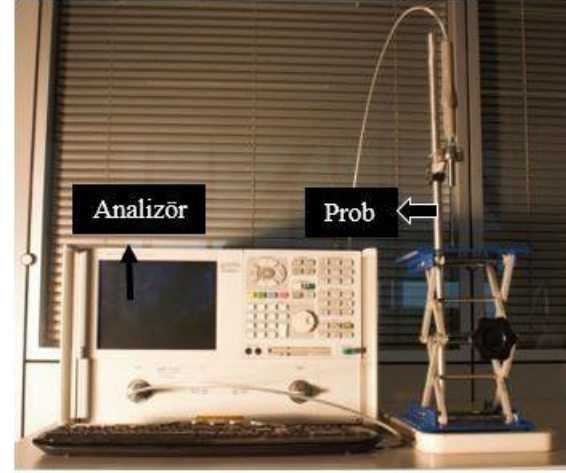
1. Giriş

Mikrodalga dielektrik spektroskopisi son 20 yıldır dokuların dielektrik özelliklerini karakterizasyon amaçlı laboratuvar ortamlarında kullanılmaktadır [1]. Doku dielektrik ölçümlerinin toplanmasındaki ana motivasyon mikrodalga görüntüleme veya mikrodalga hipertermi ya da ablasyon gibi teşhis ve tedavi yöntemlerinin geliştirilmesini sağlamaktır. Fakat, geçtiğimiz yıllarda mikrodalga dielektrik spektroskopinin tek başına bir teşhis yöntemi olarak yüksek doğrulukta kanserli doku teşhisi amaçlı kullanılabileceği öne sürülmüştür [2]. Fakat, mikrodalga dielektrik spektroskopi için sıklıkla kullanılan açık uçlu prob yönteminin yüksek hatalı ölçüm yaptığı ve bazı dokuların arasındaki dielektrik özellik farkının, yumuşak ve sert doku gibi, ölçüm hatasını tolere edebilecek kadar farklı olmadığı bilinmektedir. Matür kistik teratomlar yumuşak ve sert dokuları beraber bulduran biyolojik yapılarına örnek oluşturmaktadır. Literatürde tüm yumurtalık tümörleri arasında görülme sıklığı %10-20 arasında değişen matür kistik teratomlar en sık karşılaşılan iyi huylu tümörlerdir [3-6]. Bu tümörlerin, üreme çağındaki kadınlarda (20-40 yaş) teşhis sıklığı %45-60 arasındadır. Matür kistik teratomları yapılarında yağ, kıl, diş, kıkırdak ve kemik gibi dokuları bulundururlar. Dermoid kist ismiyle de bilinen teratomların teşhisi; ultrasonografi, bilgisayarlı tomografi ve manyetik rezonans görüntüleme gibi çeşitli yöntemlerle yapılmaktadır. Ancak bu yöntemler yalnızca operasyon öncesi planlama için ön bilgi sağlamak amaçlı kullanılmaktadır. Yakın literatürde sunulan ve doku sınıflandırılması için kullanılabilecek bir başka yöntem ise mikrodalga spektroskopi tekniğidir [7]. Mikrodalga spektroskopi ile şüphelenilen dokudan hızlıca veri toplanabilir. Daha sonra bu verilerin otomize olarak sınıflandırılması ile laboratuvar ortamında testlere ya da radyolog gibi eğitimli personele ihtiyaç duyulmaksızın dokunun çeşidine karar verilebilir. Bu teknoloji hem teşhis amaçlı hem de ameliyat sırasında sınır belirlemek amaçlı kullanılabilir.

Kemik dışı dokuların kemikleşerek kemik dokusu niteliği kazanmasına ossifikasyon denir. Bir başka ossifikasyon hastalığı ise "taş adam sendromu" olarak bilinen Fibrodysplasia ossificans progressiva (FOP) bağ dokusunun zamanla kemiğe dönüşmesine yol açan nadir bir genetik bozukluktur. Bu sendromun ilk belirtisi doğumdan sonra ve takip eden yıllarda pediatrik grubun ayak parmak boyutundaki farklılık ile gözlemlenir. Kesin tanısı ise sadece mutasyon tarama yöntemleri ile konmaktadır [8]. Bu bozukluğun herhangi bir cerrahi müdahale ile tedavisi söz konusu değildir; ancak mutasyon tarama yöntemlerinin yüksek maliyeti sebebiyle şüpheli dokuların dielektrik özelliklerinin ölçümü alternatif bir teşhis yöntemi olarak geliştirilebilir.

Mikrodalga teşhis ve tedavi yöntemleri dokular arasında doğal olarak bulunan dielektrik özellik farkına dayanır. Bu kapsamda, farklı dokuların dielektrik özellikleri literatürde farklı koşullar altında olmak üzere ölçülmüş ve dokuların kendi içerisinde su içeriğine göre dielektrik özelliklerinin farklılaştığı raporlanmıştır [9-10]. Aynı şekilde, sağlıklı dokular ile anomaliler arasında da dielektrik özellik farkları gözlemlenmiştir.

Dielektrik özellik ölçümleri genellikle açık uçlu koaksiyel prob tekniği kullanılarak gerçekleştirilmektedir [11-13]. Tipik ölçüm düzeneği Şekil 1 ile gösterilen bu tekniğin pratik uygulamaları, mikrodalga biyopsi probu gibi, daha önce literatürde öngörülmüştür [14]. Fakat dielektrik özellikler doğrudan ölçülebilen karakteristik özellikler değildir. Bu nedenle çeşitli ölçüm düzeneğinden toplanan veriler dielektrik özelliklere dönüştürülür.



Şekil 1: Tipik açık uçlu koaksiyel prob ölçüm düzeneği.

Biyolojik dokuların dielektrik özelliklerini ölçmeye en uygun olan açık uçlu prob tekniği ise yonteme özgü yüksek hata değerleri içerir. Bu hata doku heterojenitesi, kablo hareketleri, matematiksel yaklaşım gibi birçok faktörün katkısıyla yükselerek ölçümün kalitesini azaltır. Bu nedenle tek bir ölçüm sonucu elde edilen dielektrik özelliklerle doku sınıfının belirlenmesi mümkün olamamaktadır ve kontrollü deneylerle test edilen materyalden çok sayıda ölçüm örneği elde edilmesi gerekmektedir. Bir örnekten birden fazla verinin toplanması laboratuvar ortamında mümkün olsada pratik uygulamalarda tek veri ile yüksek doğrulukta ölçüm yapılmasına ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu ön çalışmada sağlıklı ve anomali gösteren dokuların arasındaki dielektrik özellik farkını en iyi şekilde temsil edecek, literatürde daha önce araştırılmamış olan, eğitim parametresi analiz edilmiştir. Güç yasası bağımlılığını tanımlamak amacıyla dielektrik özellik verileri logaritmik ölçekte incelenmiştir. Bağlı dielektrik katsayısının mikrodalga frekanslardaki doğrusal değişimi sonucu ortaya çıkan bu bağımlılığın, vücutta yumuşak ve sert dokuların ayrımı için belirleyiciliği incelenmiştir. Dolayısıyla, yumuşak dokuların kemikleşmesine yol açan genetik bozuklukların ve kemik dokusu içeren tümörlerin teşhisinde potansiyel olarak kullanılabilecek bir teknik olarak kullanılabileceği öngörülmektedir.

2. Yöntem

Biyolojik dokuların dielektrik özellik değişimlerini elektromanyetik dalga ile dokunun etkileşimi belirler. Dokuda, su gibi polar moleküllerin varlığından dolayı dielektrik özellik davranışı frekansa bağımlı olarak farklılık göstermektedir. Bu davranış, Debye denklemi ve Cole-Cole denklemleri gibi farklı modeller kullanılarak temsil edilmektedir.

Dielektrik özelliklere dayalı doku sınıflandırılmasının gerçek zamanlı yapılabilmesi için tekniğin çeşitli aşamalarının iyileştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Matematiksel yaklaşımın ve kalibrasyonun iyileştirilmesinin yanı sıra veriyi ayırmayı kolaylaştıracak parametrelerin incelenmesi gerekmektedir. Dokuların dielektrik özelliklerinin frekansa göre değişiklik göstermesi, bu özelliklerin matematiksel modellerle ifade edilmesini sağlamıştır. Literatürde öncelikle Debye tarafından polar moleküllerin frekansa bağlı dielektrik özellik davranışını incelemek amaçlı yapılan çalışma ile oluşturulan model, daha sonraki çalışmalar ile farklı formları almış ve biyolojik dokuların dielektrik özelliklerini ifade etmek için Cole-Cole denklemi (1) olarak adlandırılan

$$\hat{\epsilon}(\omega) = \epsilon_{\infty} + \frac{\epsilon_s - \epsilon_{\infty}}{1 + (j\omega\tau)^{1-\alpha}} + \frac{\sigma_i}{j\omega\epsilon_0} \quad (1)$$

ifade literatürde sıklıkla kullanılmıştır [15-17]. Bu denklemdeki parametreler açılmalık frekans ω ($2\pi f$)'a bağlı kompleks dielektrik özellik $\hat{\epsilon}(\omega)$, bağımlı dielektrik katsayısının çok yüksek frekanslardaki değeri ϵ_{∞} , statik bağımlı dielektrik katsayısı ϵ_s , boşluğun bağımlı dielektrik katsayısı ϵ_0 , iyonik iletkenlik σ_i , gevşeme zamanı τ , gevşeme zamanının katsayısını genişleten parametre α ile temsil edilmektedir.

Cole-Cole denkleminde gerçel ve sanal kısımların basit ifadesi

$$\hat{\epsilon}(\omega) = \epsilon' + j\epsilon'' = \frac{\epsilon_s + \epsilon_{\infty}(j\omega\tau)^{1-\alpha}}{1 + (j\omega\tau)^{1-\alpha}} \quad (2)$$

şeklinde. Güç parametresi α üstel davranış sergilemektedir ve α ile ilişkili dielektrik özelliklerin frekansa bağımlı değişimi ölçülmek istendiğinde logaritmik ifade karşımıza çıkmaktadır. Dielektrik özellikler logaritmik ölçekte incelendiğinde frekansa bağımlı doğrusal bir değişim göstermektedir. Gözlemlenen bu doğrusal değişim ile güç yasası varlığı kabul edilmektedir. Güç yasası varlığının, frekansa bağımlı bu davranışı modelleyen gevşeme zamanı τ ve güç parametresi ile doğrudan ilişkili olduğu öngörülmektedir [18].

Cole-Cole denkleminde iyonik iletkenlik parametresi σ_i işlemlere dahil edilmeden paydalar eşitlenir. Denklemdaki $(j\omega\tau)^{1-\alpha}$ ifadesi trigonometrik fonksiyonlar yardımıyla yeniden yazıldığında

$$(j\omega\tau)^{1-\alpha} = (\omega\tau)^{1-\alpha} \left[\cos\left(\left(1-\alpha\right)\frac{\pi}{2}\right) + j\sin\left(\left(1-\alpha\right)\frac{\pi}{2}\right) \right] \quad (3)$$

ifadesi oluşturulur. Burada, gerçel kısım $((\omega\tau)^{1-\alpha} \cos((1-\alpha)\frac{\pi}{2}))$ A, sanal kısım $((\omega\tau)^{1-\alpha} j\sin((1-\alpha)\frac{\pi}{2}))$ ise B şeklinde gösterildiğinde

$$\epsilon' + j\epsilon'' = \frac{\epsilon_s + \epsilon_{\infty}A(1-\alpha) + j\epsilon_{\infty}B(1-\alpha)}{(1+A(1-\alpha)) + jB(1-\alpha)} \quad (4)$$

ifadesi elde edilir. Bu denklemde, frekansa bağımlı davranışın güç parametresiyle doğrusal ilişkisinin mevcudiyeti, dielektrik sabitinin hem gerçel

$$\epsilon' = \epsilon_{\infty} + \frac{(\epsilon_s - \epsilon_{\infty}) \cos\left(\alpha\frac{\pi}{2}\right)}{1 + 2(\omega\tau)^{1-\alpha} \sin\left(\alpha\frac{\pi}{2}\right) + (\omega\tau)^{2(1-\alpha)}} \quad (5)$$

hem de sanal kısmında

$$\epsilon'' = \frac{(\epsilon_s - \epsilon_{\infty}) \sin\left(\alpha\frac{\pi}{2}\right)}{1 + 2(\omega\tau)^{1-\alpha} \sin\left(\alpha\frac{\pi}{2}\right) + (\omega\tau)^{2(1-\alpha)}} \quad (6)$$

ayrı ayrı gösterilebilir.

Bu sayede, farklı dokuların dielektrik davranışı sayısal olarak anlamlandırılarak görece yüksek doğrulukta sınıflandırma yapılabilir.

Bu ön çalışma kapsamında, bağımlı dielektrik katsayısını analiz etmek için İtalya Uygulamalı Fizik Enstitüsü ('Nello Carrara', IFAC-CNR)'nün açık kaynak olarak sunduğu farklı dokuların dielektrik ölçüm verileri kullanılmıştır [19]. Açık erişimli internet veri tabanından elde edilen deneysel veriler ile literatürde derlenen ilgili veriler uyum göstermektedir ve kabul edilen değer aralıkları içinde yer almaktadırlar. 18 farklı doku arasındaki dağılım (dispersiyon) davranışı 0.5 - 20 GHz frekans aralığında logaritmik ölçekte incelenmiştir ($\log_{10}(0.5e^9 \text{ Hz}) = 8.69 \text{ Hz}$, $\log_{10}(20e^9 \text{ Hz}) = 10.30 \text{ Hz}$). Bağımlı dielektrik katsayısının frekansa bağımlı doğrusal değişimi sayesinde güç yasasına uygunluğunu gösteren frekans aralığı ise 9 - 20 GHz olarak belirlenmiştir ($\log(9e^9 \text{ Hz}) = 9.95 \text{ Hz}$, $\log(20e^9 \text{ Hz}) = 10.30 \text{ Hz}$). Belirlenen bu aralıkta,

$$S(\omega) = \frac{c}{\omega^a} \quad (7)$$

ilişkisinde her iki tarafının logaritması alınarak,

$$\log S(\omega) = \log c - a \log \omega \quad (8)$$

doğrusal ilişkisi elde edilebilir. Burada, logaritmik ölçekteki frekans $\eta = \log \omega$ ve logaritmik spektrum $L(\eta) = \log(S(\omega))$ şeklinde yeniden yazıldığında

$$L(\eta) = \log c - a\eta \quad (9)$$

doğrusal denklemi oluşturulur. Bu denklem için hata terimi

$$\epsilon = \sum_i |L(\eta_i) - \hat{L}(\eta_i)|^2 \quad (10)$$

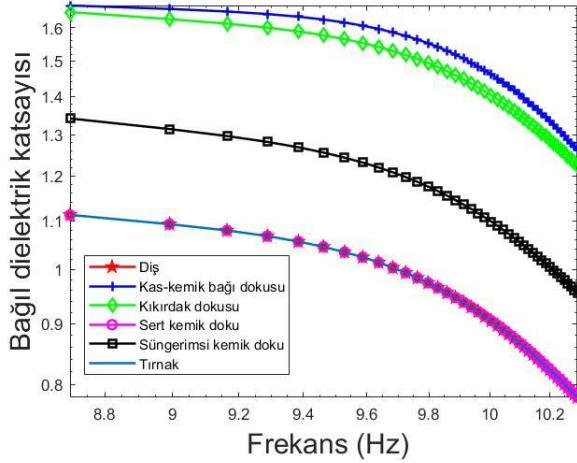
şeklinde ifade edilir. Bu terim c ve a 'ya göre enküçüklendiğinde, log-log spektrumda doğrusal uydurma problemine dönüşür. Uydurulan doğrunun eğimi üstel ölçek değerinin kestirimidir.

Dokuların güç yasası bağımlılığı doğrunun eğimi hesaplanarak incelenmiştir. Dağılım yalnızca güç parametresi α tarafından modellenmediğinden dokular arasında görülen eğim farkının aynı zamanda gevşeme zamanını belirten τ ile de ilişkili olduğu kabul edilmiştir [20].

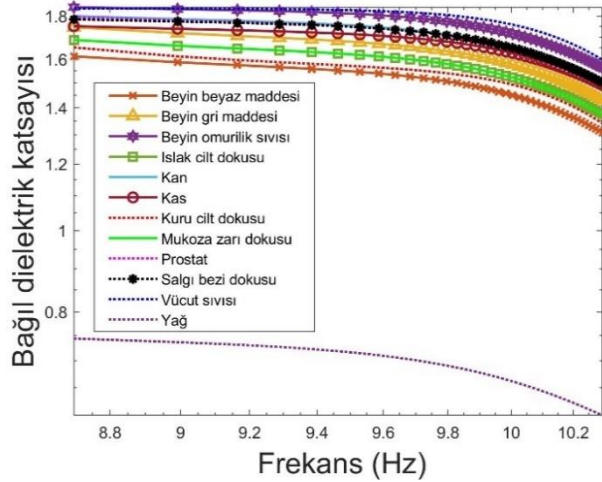
3. Bulgular

Dış, kas-kemik bağı, kırık, sert kemik, süngerimsi kemik doku ve tırnak sert dokularının 0.5 - 20 GHz frekans aralığındaki bağımlı dielektrik katsayıları Şekil 2 ile logaritmik ölçekte gösterilmiştir. Beyin beyaz/gri maddesi, beyin omurilik sıvısı, kan, kas, cilt, mukoza zarı, prostat, salgı bezi, vücut sıvısı ve yağ yumuşak dokularının 0.5 - 20 GHz frekans aralığındaki bağımlı dielektrik

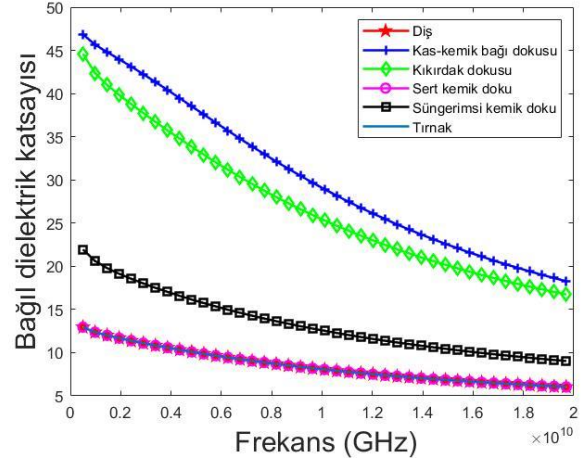
katsayıları ise Şekil 3 ile logaritmik ölçekte gösterilmiştir. Sert ve yumuşak dokulara ait dielektrik özelliklerin değişimi incelendiğinde frekansa göre farklı dağılım gösterdikleri gözlemlenmiştir. Ek olarak, 0.5 – 20 GHz frekans aralığında yumuşak ve sert dokuların bağıl dielektrik katsayılarının frekansa bağlı değişimleri güç yasasından bağımsız olarak Şekil 4 ve Şekil 5 ile gösterilmiştir.



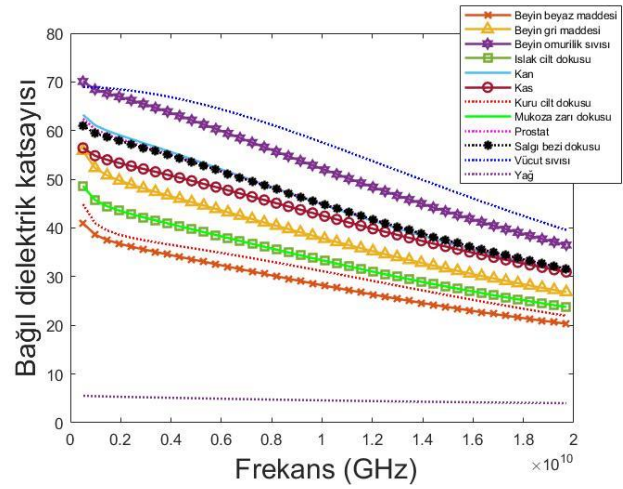
Şekil. 2: Altı farklı sert dokunun bağıl dielektrik katsayılarının logaritmik ölçüde dağılım davranışları.



Şekil. 3: On iki farklı yumuşak dokunun bağıl dielektrik katsayılarının logaritmik ölçüde dağılım davranışları.

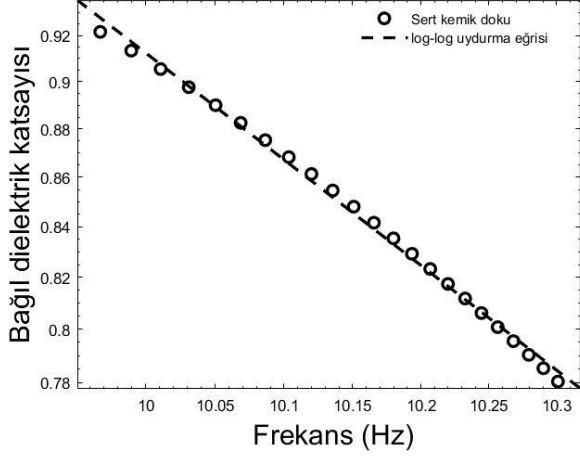


Şekil. 4: Altı farklı sert dokunun bağıl dielektrik katsayılarının frekansa bağlı değişimleri.

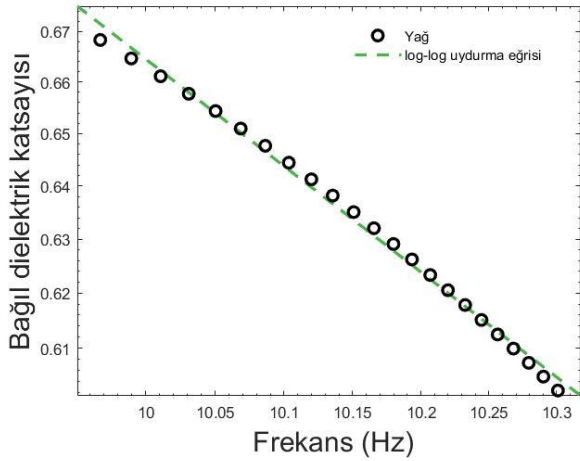


Şekil. 5: On iki farklı yumuşak dokunun bağıl dielektrik katsayılarının frekansa bağlı değişimleri.

Frekansa bağımlı dielektrik özellik değişimleri doğrusal olan sert dokuları temsilen sert kemik dokunun ve yumuşak dokuları temsilen yağ dokusunun bağıl dielektrik katsayı dağılımlarına oturtulan doğrular Şekil 6 ve Şekil 7 ile gösterilmiştir. Bu doğrunun meyil yönünü gösteren sayısal ifade ise eğim değerleriyle belirtilmiştir.



Şekil 6: Sert kemik dokusunun bağıl dielektrik katsayısının dağılımı davranışı değişimlerinin incelenmesi sonucunda her bir dokunun logaritmik ölçüde eğim kestirimi.



Şekil 7: Yağ dokusunun bağıl dielektrik katsayısının dağılımı davranışı değişimlerinin incelenmesi sonucunda her bir dokunun logaritmik ölçüde eğim kestirimi.

On sekiz farklı dokunun farklı frekanslardaki bağıl dielektrik katsayıları Tablo 1 ile gösterilmiştir. Bağıl dielektrik katsayısının güç yasasına uygunluğunu göstermek için incelenen 9-20 GHz frekans aralığında, bulunan eğim değerleri ise Tablo 2 ve Tablo 3 ile gösterilmiştir. Bağıl dielektrik katsayısının eğim kestirimiyle bulunan sonuçlara bakıldığında sert dokular için ortalama eğim değeri $-4,95 \pm 0,19$ sapmayla hesaplanmışken yumuşak dokunun eğim değerlerinin ortalama ve standart sapması ise $-3,28 \pm 0,15$ olarak hesaplanmıştır. Buna ek olarak, doğru uydurma hatasının sert dokular için ortalama değeri $7.28E-05$ iken, yumuşak dokular için bu değer $1.83E-04$ olarak hesaplanmıştır.

Tablo 1: Yumuşak ve sert dokuların farklı frekanslardaki bağıl dielektrik katsayısı değerleri.

	Frekans [Hz]	Bağıl Dielektrik Katsayısı
Yağ	500000000	5.54
	10055000000	4.59
	20000000000	4.00
Salgı bezi dokusu	500000000	60.96
	10055000000	45.06
	20000000000	31.59
Prostat	500000000	62.45
	10055000000	45.15
	20000000000	31.64
Mukoza zarı dokusu	500000000	48.62
	10055000000	33.46
	20000000000	23.76
Kuru cilt dokusu	500000000	44.91
	10055000000	31.23
	20000000000	21.96
Kas	500000000	56.44
	10055000000	42.68
	20000000000	30.95
Kan	500000000	63.25
	10055000000	45.01
	20000000000	31.01
Islak cilt dokusu	500000000	48.62
	10055000000	33.46
	20000000000	23.76
Beyin omurilik sıvısı	500000000	70.09
	10055000000	52.32
	20000000000	36.50

Beyin gri maddesi	Frekans [Hz]	Bağıl Dielektrik Katsayısı
	500000000	55.83
	10055000000	38.03
	20000000000	26.83
Beyin Beyaz maddesi	Frekans [Hz]	Bağıl Dielektrik Katsayısı
	500000000	41.00
	10055000000	28.34
	20000000000	20.33
Vücut sıvısı	Frekans [Hz]	Bağıl Dielektrik Katsayısı
	500000000	68.98
	10055000000	57.77
	20000000000	39.59
Sert kemik doku	Frekans [Hz]	Bağıl Dielektrik Katsayısı
	500000000	12.94
	10055000000	8.10
	20000000000	6.03
Diş	Frekans [Hz]	Bağıl Dielektrik Katsayısı
	500000000	12.94
	10055000000	8.10
	20000000000	6.03
Kas kemik bağı dokusu	Frekans [Hz]	Bağıl Dielektrik Katsayısı
	500000000	46.84
	10055000000	29.22
	20000000000	18.27
Kıkırdak dokusu	Frekans [Hz]	Bağıl Dielektrik Katsayısı
	500000000	44.60
	10055000000	25.55
	20000000000	16.73
Süngerimsi kemik doku	Frekans [Hz]	Bağıl Dielektrik Katsayısı
	500000000	21.95
	10055000000	12.63
	20000000000	9.02
Tırnak	Frekans [Hz]	Bağıl Dielektrik Katsayısı
	500000000	12.94
	10055000000	8.10
	20000000000	6.03

Tablo 2: Bağıl dielektrik katsayısı için eğim kestirimleri.

Sert Dokular	Eğim	Doğru Uydurma Hatası
Diş	-5.10	3.35E-05
Kas-kemik bağı dokusu	-4.98	1.85E-04
Kıkırdak dokusu	-4.67	1.02E-04
Sert kemik doku	-5.10	3.35E-05
Süngerimsi kemik doku	-4.75	4.96E-05
Tırnak	-5.10	3.35E-05

Tablo 3: Yumuşak dokuların bağıl dielektrik katsayısı için eğim kestirimleri.

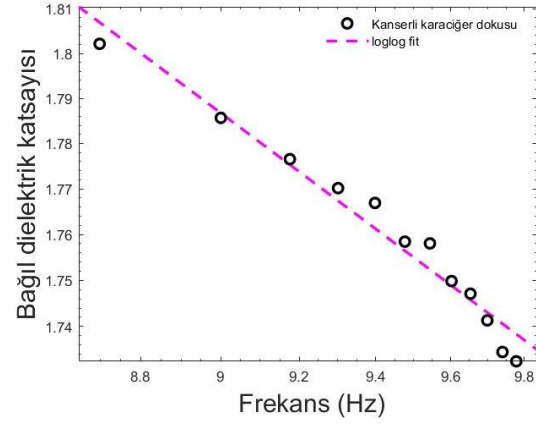
Yumuşak Dokular	Eğim	Doğru Uydurma Hatası
Beyin beyaz maddesi	-3.44	1.44E-04
Beyin gri maddesi	-3.32	1.66E-04
Beyin omurilik sıvısı	-3.14	1.87E-04
Islak cilt dokusu	-3.38	1.57E-04
Kan	-3.39	1.87E-04
Kas	-2.94	1.57E-04
Kuru cilt dokusu	-3.52	2.89E-04
Mukoza zarı dokusu	-3.38	1.57E-04
Prostat	-3.22	1.78E-04
Salgı bezi dokusu	-3.22	1.77E-04
Vücut sıvısı	-3.17	3.67E-04
Yağ	-3.18	9.88E-06

4. Tartışma ve Sonuçlar

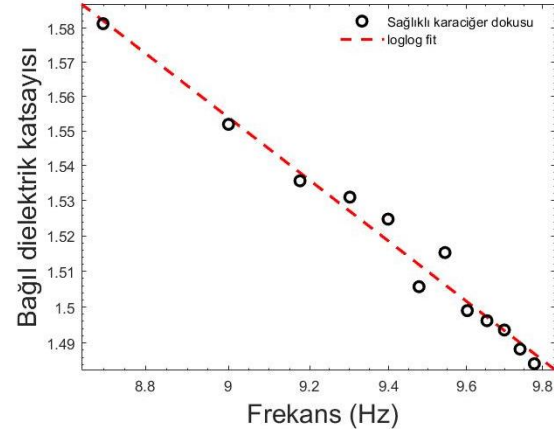
Bağıl dielektrik katsayısının belirli bir frekans aralığındaki eğim kestirimleri kıyaslandığında yumuşak ve sert biyolojik dokular arasında belirgin bir fark gözlemlenmiştir. Dielektrik özelliklerin açık uçlu koaksiyel prob tekniği ile ölçümünden elde edilen veriler, bu dokular arasındaki belirgin farklılığı doğrudan gösterebilmekte yetersiz kalabilmektedir. Dokuların farklı frekanslardaki bağıl dielektrik katsayıları incelendiğinde değerlerin frekans arttıkça azalmakta olduğu görülmektedir. Düşük miktarda su içeren dokuların dielektrik davranışı niceliksel olarak yüksek miktarda su içeren dokularınkine benzerdir. Ancak bağıl dielektrik sabitinin değerleri biraz daha düşüktür. Ayrıca düşük su miktarı içeren dokularda da frekansa bağlı değişen büyük varyasyonlar vardır. Su ihtiva eden dokular yüksek bir dielektrik katsayısına sahip olduğundan, dokunun bağıl dielektrik katsayısı, dokunun su oranındaki küçük değişimlerle birlikte önemli ölçüde değişecektir. Bu nedenle dokular ihtiva ettiği su miktarına bağlı olarak ayrıştırılabilmektedir. Fakat, bazı sert ve yumuşak dokular bağıl dielektrik özellik olarak yüksek farklılık gösterememektedir. Dielektrik özelliklerin güç yasası bağımlılığı bu hususta önemli bilgiler sunmaktadır. Bu sayede hesaplanan eğim değerleri arasında yapılabilecek sınıflandırma ile kemikleşmeye sebebiyet veren genetik bozuklukların ve kemik dokusu içeren tümörlü dokuların teşhisi için kullanılabilir mikrodalga yöntemlerinin geliştirilebileceği öngörülmektedir.

Bu makale kapsamında bir ön çalışma sunulmuş ve normal ve sertleşmiş doku örneklerine ilişkin ölçüm sonuçları bulunmamaktadır. Aynı şekilde literatürde yumuşak doku ossifikasyonuna ilişkin dielektrik özellik verisi bulunmamaktadır. Bu nedenle subulan tekniğin performansını gerçek ölçümler ile değerlendirmek amaçlı kanserli ve sağlıklı malin ve sağlıklı karaciğer dokularından elde edilmiş bağıl dielektrik özellikler kullanılmıştır [21]. Karaciğer dokusu ölçümleri her bir sınıfta 96 adet ölçüm olacak şekilde ayrılmış ve bağıl dielektrik katsayılarına ait eğim değerleri hesaplanmıştır. Böylece her bir ölçüme ilişkin eğim değeri makine öğrenmesi algoritmalarına verilerek sınıflandırma yapılmıştır. Eğim değerleri kategorik özelliğe sahip olduğundan, makine öğrenme algoritması uygulanırken en temel sınıflandırma modellerinden biri olan lojistik regresyon kullanılmıştır. Eğim parametresi veri olarak tanımlandığında %80 üzerinde doğruluk elde edilmiştir. Makine öğrenme algoritmalarında üç sınıf ayırımında doğruluğu yükseltmek amaçlı eğim parametresinin parametre olarak kullanılabilirliği ön görülmektedir [21-22]. Makine öğrenme algoritmaları kullanılmadan sadece açık uçlu prob ile toplanan dielektrik özellik ölçümüne dayalı doku karakterizasyon doğruluğunun ise %70'e kadar düşebileceği bilinmektedir.

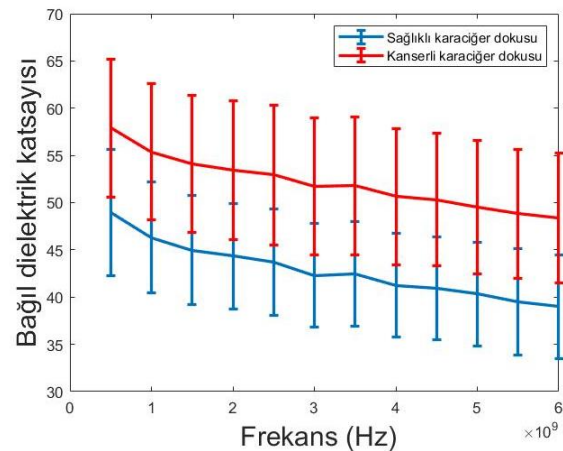
Sağlıklı karaciğer dokusunun bağıl dielektrik katsayısının ortalama eğim değeri -0.50 ± 0.14 sapma ile hesaplanmışken, kanserli karaciğer dokusunun eğim ve sapması -0.38 ± 0.07 olarak hesaplanmıştır. Kanserli ve sağlıklı dokuya ilişkin örnek eğim kestirim değerleri Şekil 8 ve Şekil 9 ile verilmiştir. İki tip karaciğer dokusunun 0.5 - 6 GHz aralığında bağıl dielektrik katsayılarının frekansa bağlı değişimi ise Şekil 10 ile gösterilmiştir. Bu kapsamda, dielektrik özelliklerin ayırt edici derecede farklılık göstermediği koşullarda eğim enformasyonunun değişken olarak doku kategorizasyonunda tek başına ya da diğer parametrelere ek olarak kullanılabilirliği ve sistem hatalarından kaynaklı hataları kompanse edebileceği öngörülmüştür.



Şekil 8: Kanserli karaciğer dokusunun bağıl dielektrik katsayısının dağılım davranışı değişimlerinin incelenmesi sonucunda her bir dokunun logaritmik ölçüde eğim kestirimi.



Şekil 9: Sağlıklı karaciğer dokusunun bağıl dielektrik katsayısının dağılım davranışı değişimlerinin incelenmesi sonucunda her bir dokunun logaritmik ölçüde eğim kestirimi.



Şekil 10: Sağlıklı ve kanserli siçan karaciğer dokusunun 0.5-6 GHz aralığında bağıl dielektrik katsayılarının frekansa bağlı değişimi.

4. Kaynaklar

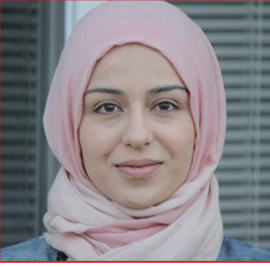
- [1] S. Gabriel, R. W. Lau, and C. Gabriel, "The dielectric properties of biological tissues: III. Parametric models for the dielectric spectrum of tissues," *Physics in Medicine and Biology*, vol. 41, no. 11, pp. 2271–2293, Nov. 1996.
- [2] T. Yilmaz, M.A. Kılıç, M. Erdoğan, M. Çayören, D. Tunaoglu, İ. Kurtoğlu, Y. Yaslan, H. Çayören, A. E. Arıkan, S. Teksöz and G. Cancan, "Machine learning aided diagnosis of hepatic malignancies through in vivo dielectric measurements with microwaves," *Physics in Medicine and Biology*, vol. 61, no. 13, pp. 5089–5102, Jun. 2016.
- [3] H. Sahin, S. Abdullazade, and M. Sancı, "Mature cystic teratoma of the ovary: a cutting edge overview on imaging features," *Insights into Imaging*, vol. 8, no. 2, pp. 227–241, Jan. 2017.
- [4] F. Kikkawa *et al.*, "Diagnosis of squamous cell carcinoma arising from mature cystic teratoma of the ovary," *Cancer*, vol. 82, no. 11, pp. 2249–2255, Jun. 1998.
- [5] B. Cakmak, M. Nacar, N. Aliyev, D. Koseoglu, and Z. Ozsoy, "Mature cystic teratomas: Relationship between histopathological contents and clinical features," *Nigerian Journal of Clinical Practice*, vol. 18, no. 2, p. 236, 2015.
- [6] A. Hackethal, D. Brueggmann, M. K. Bohlmann, F. E. Franke, H.-R. Tinneberg, and K. Münstedt, "Squamous-cell carcinoma in mature cystic teratoma of the ovary: systematic review and analysis of published data," *The Lancet Oncology*, vol. 9, no. 12, pp. 1173–1180, Dec. 2008.
- [7] T. Yilmaz, "Multiclass Classification of Hepatic Anomalies with Dielectric Properties: From Phantom Materials to Rat Hepatic Tissues," *Sensors*, 2020, vol. 20, pp. 530.
- [8] F. S. Kaplan, M. Le Merrer, D.L. Glaser, R. J. Pignolo, R. E. Goldsby, J. A. Kitterman, J. Groppe and E. M. Shore, "Fibrodysplasia ossificans progressiva," *Best Practice & Research Clinical Rheumatology*, vol. 22, no. 1, pp. 191–205, Mar. 2008.
- [9] M. Lazebnik *et al.*, "A large-scale study of the ultrawideband microwave dielectric properties of normal, benign and malignant breast tissues obtained from cancer surgeries," *Physics in medicine and biology*, vol. 52, no. 20, pp. 6093–115, 2007.
- [10] C. Gabriel, S. Gabriel, and E. Corthout, "The dielectric properties of biological tissues: I. Literature survey," *Physics in medicine and biology*, vol. 41, no. 11, pp. 2231–49, 1996.
- [11] A. La Gioia, E. Porter and I. Merunka, "Open-Ended Coaxial Probe Technique for Dielectric Measurement of Biological Tissues: Challenges and Common Practices," *Diagnostics (Basel, Switzerland)*, vol. 8, no. 2, p. 40, 2018.
- [12] T. W. Athey, M. A. Stuchly, and S. S. Stuchly, "Measurement of Radio Frequency Permittivity of Biological Tissues with an Open-Ended Coaxial Line: Part I," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 30, no. 1, pp. 82–86, Jan. 1982.
- [13] M. A. Stuchly, T. W. Athey, G. M. Samaras, and G. E. Taylor, "Measurement of Radio Frequency Permittivity of Biological Tissues with an Open-Ended Coaxial Line: Part II- Experimental Results," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 30, no. 1, pp. 87–92, Jan. 1982.
- [14] W. Anderson, "Microwave biopsy probe- Anderson, Wendell," Freepatentsonline.com, Apr. 2006.
- [15] P. J. Debye, "Polar molecules," "Chemical Catalog Company, Incorporated, 1929.
- [16] K. S. Cole and R. H. Cole, "Dispersion and Absorption in Dielectrics I. Alternating Current Characteristics," *The Journal of Chemical Physics*, vol. 9, no. 4, pp. 341–351, Apr. 1941.
- [17] K. S. Cole and R. H. Cole, "Dispersion and Absorption in Dielectrics II. Direct Current Characteristics," *The Journal of Chemical Physics*, vol. 10, no. 2, pp. 98–105, Feb. 1942.
- [18] A. K. Jonscher, "Dielectric relaxation in solids," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 32, no. 14, pp. R57–R70, Jan. 1999, doi: 10.1088/0022-3727/32/14/201.
- [19] D. Andreuccetti, "Dielectric Properties of Body Tissues: Home page," Ifac.cnr.it, 2018. [Online].
- [20] S. Gabriel, R. W. Lau, and C. Gabriel, "The dielectric properties of biological tissues: II. Measurements in the frequency range 10 Hz to 20 GHz," *Physics in Medicine and Biology*, vol. 41, no. 11, pp. 2251–2269, Nov. 1996.
- [21] Yilmaz, T. "Microwave Spectroscopy Based Classification of Rat Hepatic Tissues: On the Significance of Dataset". *Balkan Journal of Electrical and Computer Engineering* 8 (2020): 307-313
- [22] Yilmaz, T. Multiclass Classification of Hepatic Anomalies with Dielectric Properties: From Phantom Materials to Rat Hepatic Tissues. *Sensors* 2020, 20, 530.

Seda KESKİN



Seda KESKİN, Acıbadem Üniversitesi Tıp Mühendisliği bölümü Lisans eğitimini 2019 yılında üçüncülük derecesiyle tamamlamıştır. İstanbul Teknik Üniversitesi (İTÜ) Biyomedikal Mühendisliği bölümünde yüksek lisans eğitimine devam etmektedir. 2017 yılında Polonya Wrocław'daki University of Physical Education'da Erasmus stajını yaparak ampüte ve engelli hastalar için deneysel nörofizyolojik ve nöro görüntüleme araştırmalarını incelemiştir. 2018-2019 yılları arasında Acıbadem Üniversitesi Biyomedikal Görüntüleme, Araştırma ve Geliştirme Grubu TÜBİTAK 1003 - Lisans Bursiyeri ve TÜBİTAK 2209/A Programı Baş Araştırmacısı olarak çalışmalar gerçekleştirmiştir. Şuan, Bıçakçılar Medical Devices şirketinde Ürün Yöneticisi Yardımcısı olarak çalışmaya devam etmektedir.

Tuba YILMAZ



Tuba YILMAZ, lisans derecesi ile İstanbul Teknik Üniversitesinden 2007 yılında, yüksek lisans derecesi ile Mississippi Eyalet Üniversitesinden 2009 yılında ve doktora derecesini Queen Mary, Londra Üniversitesi Elektronik Mühendisliği bölümünden 2013 yılında mezun olmuştur. Halen İstanbul Teknik Üniversitesi (İTÜ) Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü'nde Doktor Öğretim Üyesi ve Marie Skłodowska Curie Araştırma Desteği ile görev yapmaktadır. Daha önceinde ise Mitos Medical Teknolojiler şirketinde Araştırma Departmanında bir yıl geçirdi. 2013-2014 yılları arasında Dr. Yılmaz, Utah Eyalet Üniversitesinde (USU) Doktora Sonrası Araştırma Görevlisi olarak bulundu. Dr. Yılmaz, Eta Kappa Nu Elektrik ve Bilgisayar Mühendisliği Onur Derneği üyesidir. 2017 yılında URSI Genç Bilim Adamı Ödülünü almıştır. Araştırma alanları arasında giyilebilir ve implante edilebilir antenler, RF algılama, dielektrik spektroskopi, evrimsel optimizasyon teknikleri, kablosuz güç aktarımı ve mikrodalga görüntüleme yer almaktadır.

Prof. Dr. Tayfun AKGÜL



Prof. Dr. Tayfun AKGÜL, lisans ve yüksek lisans derecelerini, sırasıyla 1985 ve 1988 yıllarında İTÜ Elektronik ve Haberleşme Bölümü'nde tamamladı. Doktorasını 1994 yılında Pittsburgh Üniversitesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü'nde bitirdi. 1986 - 1988 arası TÜBİTAK Temel Bilimler Araştırma Enstitüsü'nde, Eylül 1988'den itibaren Çukurova Üniversitesi'nde çalışmaya başladı. 1989-1994 arasında Pittsburgh Üniversitesi'nde doktora çalışması yaptı. 1996'da Çukurova Üniversitesi'nde Doçent oldu. 1997-1999 tarihleri arasında Drexel Üniversitesi'nde bulundu. 1999-2002 arasında TÜBİTAK-MAM'da Başuzman Araştırmacı unvanıyla çalıştı. Temmuz 2002'den itibaren İTÜ Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü'nde görev yapmaktadır. İTÜ ARIS Lab (Advanced Research on Images and Signals-İleri Sinyal ve Görüntü İşleme) adlı araştırma laboratuvarının kurucusu ve yöneticisidir.

Büyük Ölçekli Fotovoltaik Santrallerde Aktif Güç Kontrol Yöntemlerinin Frekans Kararlılığı Analizi

Frequency Stability Analysis of Active Power Control Methods in Large-Scale Photovoltaic Plants

Bora Çavdar¹, Ömür Akyazi¹, Erdinç Şahin¹, Fatih Mehmet Nuroğlu²



¹Karadeniz Teknik Üniversitesi, Of Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Trabzon, Türkiye

boracavdar@ktu.edu.tr, oakyazi@ktu.edu.tr, esahin@ktu.edu.tr

²Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Trabzon, Türkiye

fmn@ktu.edu.tr

Öz

Bu çalışmada Western Electricity Coordinating Council (WECC) tarafından tasarlanan FV santralin frekansa destek veren ve vermeyen aktif güç kontrol yöntemlerinin (AGKY) farklı senaryolar için frekans kararlılığı analizi DigSilent Powerfactory programında yapılmıştır. Yapılan analiz güç sistemlerinde meydana gelen geçici olaylar üzerinden değerlendirilmiştir. Dikkate alınan geçici olaylar generatörün, yükün ve hattın geçici olarak devreden çıkmasıdır. Ayrıca 3 faz kısa devre arızası için de analiz yapılmış ve elde edilen tüm sonuçlar değerlendirilmiştir.

Anahtar kelimeler: Büyük ölçekli fotovoltaik santral, frekans kararlılığı analizi, frekans desteği, WECC

Abstract

Güç sistemlerinde fotovoltaik (PV) santrallerin entegrasyonu gün geçtikçe artmaktadır. Bu artan entegrasyon sebebiyle PV santrallerin yüksek penetrasyon seviyesinde güç sistemine katılması toplam atalet momentini azaltıcı yönde etki ortaya çıkarmaktadır. Ayrıca yüksek penetrasyonda güç sistemine katılan bu santrallerin frekans desteği sağlamaması, sistemde frekans açısından güvenlik sorunu teşkil etmektedir. Bu yüzden, bu çalışmada Western Electricity Coordinating Council (WECC) tarafından tasarlanan PV santralin frekansa destek veren ve vermeyen aktif güç kontrol yöntemlerinin (AGKY) farklı senaryolar için frekans kararlılığı analizi DigSilent Powerfactory programında yapılmıştır. Yapılan analiz güç sistemlerinde meydana gelen geçici olaylar üzerinden değerlendirilmiştir. Dikkate alınan geçici olaylar generatörün, yükün ve hattın geçici olarak devreden çıkmasıdır. Ayrıca 3 faz kısa devre arızası için de değerlendirme yapılmış ve elde edilen tüm sonuçlar değerlendirilmiştir.

Anahtar kelimeler: Büyük ölçekli fotovoltaik santral, frekans kararlılığı analizi, frekans desteği, WECC

1. Giriş

Dünya nüfusunun hızlı artışı, fosil enerji kaynaklarının rezervlerinin azalması ve artan enerji ihtiyacı sebebiyle özellikle güneş enerjisi başta olmak üzere yenilenebilir enerji kaynaklarına olan talep gün geçtikçe artmaktadır [1]. Rüzgâr ve PV santrallerin güç sistemlerinde kullanılması sistemdeki geleneksel yapının değişmesi gerekliliğini ortaya çıkarmıştır. Bu gerekliliklerden biri sistemin frekansının, bahsedilen santraller tarafından düzenlenmesi durumudur. Bu yüzden, yapılan çalışmada PV santralin frekans düzenlenmesindeki etkisi incelenmiştir.

PV santrallerin döner yapıda elemanı bulunmamaktadır. Ayrıca, PV santraller genellikle, hava koşullarına bağlı olarak, maksimum güç noktası takip (MGNT) edilerek çalıştırılıp maksimum güç elde edilir [2, 3]. Bu sebeplerden dolayı, PV santrallerin güç sistemlerinde yeri arttıkça sistemin toplam atalet momenti ve primer frekans desteği azalmaktadır [4]. Frekans kontrolünde bu olumsuz etkilerin ortadan kalkması için PV santrallerin frekansa destek vermesi gereklidir. Ayrıca PV santrallerin dönen yapılarının olmayışı ve sadece güç elektroniği elemanlarıyla donatılmış olması frekansa destek vermelerini rüzgâr santrallerinden daha avantajlı hale getirir [5].

1.1. Literatür Araştırması

Literatürde, evirici aracılığıyla güç sistemlerine entegre edilen enerji kaynaklarının frekans düzenlemesine katıldığı çalışmalar görülmektedir. Bu çalışmalar rüzgâr santrallerinin [6-8], PV santrallerin [3, 5, 9-15] ve PV santrallerle enerji depolama birimlerinin [16, 17] kullanıldığı güç sistemlerini içermektedir.

PV santrallerin sisteme frekans desteği için yapılan çalışmaların bazılarında mikro şebekelerdeki [9, 10], bazılarında ise büyük ölçekli PV santralin iletim seviyesindeki [3, 12, 13] etkisinin incelenmeleri gerçekleştirilmiştir. Literatürde yapılan çalışmalarda dağıtık [12] ve merkezi [13] olarak kullanılan santraller; değişik zaman aralıkları için farklı penetrasyon seviyelerinde PV santralin frekansa verdiği destek [5]; PV santralin frekansa yanıt olarak ürettiği aktif güç tepkisinin daha hızlı olabilmesi [15]; PV santralin güç sisteminde farklı penetrasyon seviyelerinde bulunup frekans desteği sağlaması [18] vb. incelemeler yapılmıştır. Genellikle benzeri çalışmalarda yükün devreden çıkması durumu incelenmiştir.

1.2. Literatüre Katkı

Bu çalışmada yapılan katkılar aşağıda verilmiştir.

- PV santral AGKY'nin güç sistemlerinde sıklıkla meydana gelen geçici olaylar ve 3 faz kısa devre arızası durumu için,
- PV santrale yakın ve uzak konumlarda meydana gelmesi durumunda olay konumunun etkisi için

frekans kararlılığı analizinin yapılması bu çalışmanın literatüre katkısıdır.

1.3. Organizasyon Şeması

Bu makalede organizasyon sırası aşağıda verilmiştir.

- Bölüm II'de yapılan çalışmadaki modellemelerden bahsedilmiştir. Bu modellemelerde matematiksel model, güç sisteminin ve PV santralin modeli bulunmaktadır.
- Bölüm III'te çalışmada gerçekleştirilen senaryolar ve bu senaryoların sonuçlarının analizi yapılmıştır.
- Bölüm IV'te tüm çalışmada elde edilen sonuçların değerlendirilmesi gerçekleştirilmiştir.

2. Modellemeler

2.1. Matematiksel Model

Arıza meydana geldiğinde rotor ekseninin göreceli pozisyonu manyetik alan eksenine sabit durumda bulunmasıyla oluşan güç açısı ivmeli bir hareketle değişir [19]. Bu hareketi açıklamak için aşağıda Salınım Denklemi verilmiştir.

$$Jw_m \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = P_m - P_e \quad (1)$$

Elde edilen (1) numaralı denkleme senkron generatörlerin rotor hızlarında değişikliğin nasıl meydana geldiğini açıklamaktadır. Bu denklemde P_m türbin güç çıkışı ya da mekanik güç olarak ifade edilebilir. P_e ise senkron generatörden talep edilen aktif güç ya da elektriksel güç olarak ifade edilebilir. Bir senkron generatörde elektriksel güç (P_e) mekanik güçten düşük olduğu durumda generatörün rotoru hızlanmaya başlarken tam tersi durumda rotor hızında yavaşlama görülür. Bir güç sisteminde generatörden talep edilen gücün artması devreye yük alınması ya da devreden generatör çıkması gibi durumlar olurken tam tersi durumlarda ve üç faz kısa devre arızası gibi bir durumda generatörün üretimi talep edilen tüketimi geçer.

Bir senkron generatörlü yapı için güç hız karakteristiği aşağıdaki gibi ifade edilebilir [20].

$$\frac{\Delta w}{w_n} = -\rho \frac{\Delta P_m}{P_n}, \quad \frac{\Delta P_m}{P_n} = -K_i \frac{\Delta w}{w_n} \quad (2)$$

Yukarıda verilen eşitlikte ρ ve $K = 1/\rho$ governor sisteminin sırasıyla hız düşüm ve kazanç katsayısını, P_n nominal güç çıkışını, Δw hız değişimini ve w_n nominal hızı ifade eder. Denklem (2)'den yararlanılarak ve hız ile frekans orantılı olduğundan i . makine için aşağıdaki denklem yazılabilir.

$$\frac{\Delta f}{f_n} = -\rho_i \frac{\Delta P_{mi}}{P_{ni}}, \quad \frac{\Delta P_{mi}}{P_{ni}} = -K_i \frac{\Delta f}{f_n} \quad (3)$$

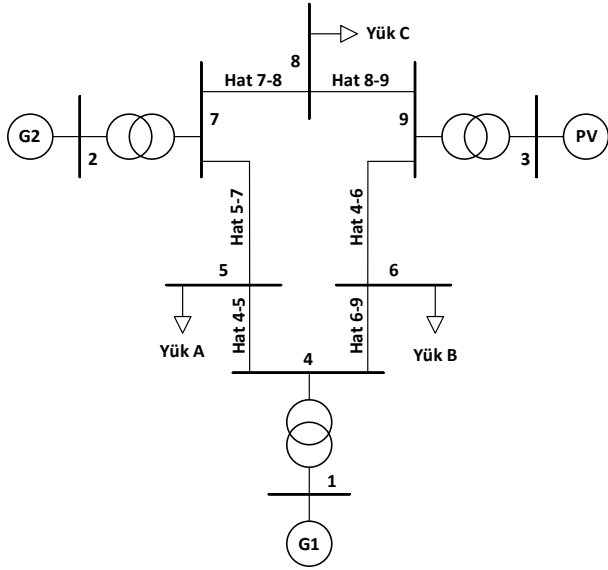
Burada Δf frekans değişimini, f_n nominal frekansı ifade eder. Toplam güç ile frekans arasındaki ilişkisi (4) numaralı denklemde elde edilebilir.

$$\begin{aligned} \Delta P_T &= \sum_{i=1}^{N_G} \Delta P_{mi} = -\frac{\Delta f}{f_n} \sum_{i=1}^{N_G} K_i P_{ni} \\ &= -\Delta f \sum_{i=1}^{N_G} \frac{K_i P_{ni}}{f_n} \end{aligned} \quad (4)$$

(4) numaralı denklemde sistemdeki toplam güç değişikliğine PV santralin etki etmesi frekanstaki değişikliği etkilemektedir.

2.2. Güç Sisteminin Modellemesi

Yapılan çalışmada IEEE 9 baralı güç sistemi kullanılmıştır [21]. Bu güç sistemi, Bara 3'te bulunan senkron generatörlü santral kaldırılıp yerine PV santral eklenerek, Şekil 1'deki gibi düzenlenmiştir. Sistemde bulunan tüm generatörlerde governor ve otomatik gerilim regülatörü (AVR) bulunmaktadır. G1 generatörünün governor ve AVR'si sırasıyla HYGOV, EXAC1; G2 generatörünün ise sırasıyla GAST, IEEE1'dir. Sistemin statik ve dinamik verileri için [22] bakılabilir.



Şekil 1. Düzenlenmiş IEEE 9 Baralı Güç Sistemi

Yapılan güç sistemi modellemesinde Tablo 1'de generatör Tablo 2'de yük verileri verilmiştir. Ayrıca G1 generatörünün bağlı olduğu bara salınım barası olarak seçilmiş ve bara geriliminin açısı 0° alınmıştır.

Tablo 1. Generatör Güç ve Gerilim Değerleri

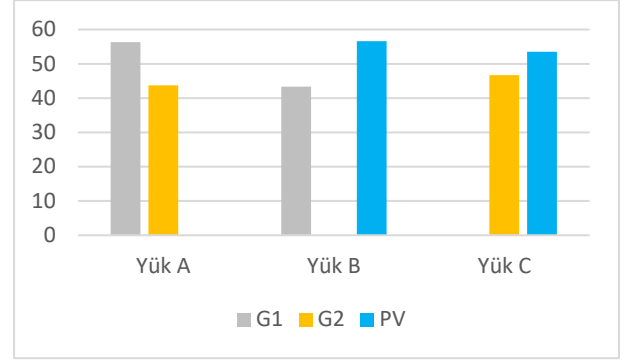
Kaynak	Bara	İşletme Gücü (MW)	Nominal Güç (MVA)	Gerilim Büyüklüğü (pu)
G1	Bara 1	-	250	1.040
G2	Bara 2	100	150	1.025
PV	Bara 3	100	120	1.000

Tablo 2. Yük Güç Değerleri

Yük	Bara	Aktif Güç (MW)	Reaktif Güç (MVar)
Yük A	Bara 5	120	50
Yük B	Bara 6	80	20
Yük C	Bara 8	100	30

Tablo 1'de verilen güç üretim değerlerine bakıldığında bu çalışmada kullanılan PV santral tüm sistemdeki yükün yaklaşık %33,3'ünü karşılamaktadır.

Bu çalışmada, yüklerin hangi generatörler tarafından hangi oranda aktif güçle beslendiğini gösteren grafik Şekil 2'de verilmiştir.

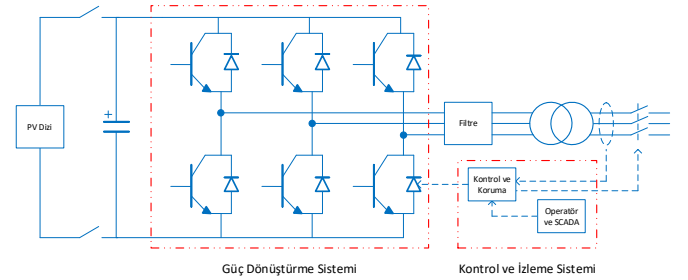


Şekil 2. Yüklerin Generatörler Tarafından Beslenme Yüzdeleri

Şekil 2'de yüklerin generatörler tarafından beslenmesi, yük değerlerinin yüzdesi olarak gösterilmiştir. Örneğin Yük A'nın %56,3 aktif güç talebini G1 generatörü sağlamaktadır. Bu grafik senaryolardaki sonuçların anlaşılmasında önem arz etmektedir.

2.3. PV Santralin Güç Sistemindeki Modellemesi

Güç sistemlerinde dinamik çalışmalar açısından inceleme yaparken PV santral modellemesinin buna uygun yapılması gerekmektedir. PV santralin güç sisteminde yüksek aktif güç üretimi yaptığı Tablo 1'de görülmektedir. Bu yüzden bu çalışmada büyük ölçekli PV santral modeli kullanılmış ve bu model Şekil 3'te verilmektedir.



Şekil 3. Fotovoltaik Santralin Yapısı

Yapılan çalışmada WECC kontrol modülleri kullanılarak DigSilent Powerfactory programında PV santralin kontrol yapısı oluşturulmuştur. Bu çalışmada kullanılan PV santral WECC kontrol modülleri Renewable Energy Generator Converter (REGC_A), Renewable Energy Electrical Control (REEC_B), ve Renewable Energy Plant Controller (REPC_A)'dır. Çalışmada kullanılan kontrol modüllerinden REGC_A, REEC_B'den gelen akım komutlarıyla güç sistemine akım sağlarken REEC_B modülü lokal ve REPC_A modülü santral seviyesinde kontrolü sağlar. Ayrıca REPC_A kontrol modülü PV santralin frekansa göre aktif güç kontrolü yapmasına olanak verir. WECC kontrol modülleri hakkında daha detaylı bilgiye [23] ve [24] numaralı çalışmalardan ulaşılabilir.

Bu çalışmada WECC kontrol modülleri kullanılarak PV santralin AGKY'nin [24] sistemde yaptığı etki incelenmiştir. Bahsi geçen AGKY Tablo 3'te verilmektedir.

Tablo 3. Aktif Güç Kontrol Yöntemleri

Yöntem	Gerekli Modüller	frqflg	ddn (pu)	dup (pu)
NGR	REEC_B	0	-	-
GRDR	REEC_B + REPC_A	1	20	0
GRU&DR	REEC_B + REPC_A	1	20	15

Tablo 3'te verilen kontrol yöntemleri aşağıda açıklanmıştır.

- No governor response (NGR): Frekansa PV santralin aktif güç tepkisi vermediği kontrol yöntemidir.
- Governor response, down regulation (GRDR): Frekans arttığında PV santralin frekansı azaltıcı yönde tepki verdiği yani aktif güç üretimini azalttığı kontrol yöntemidir.
- Governor response, up and down regulation (GRU&DR): Frekans arttığında ya da azaldığında PV santralin frekansı düzenlemek için tepki verdiği aktif güç kontrol yöntemidir. PV santral frekans artarken aktif gücünü azaltarak, frekans azalırken aktif gücünü artırarak tepki verir.

Üç farklı kontrol yönteminde PV santrali kullanmak için Tablo 3'te belirtilen *frqflg* bayrağı, *ddn* ve *dup* parametreleri kullanılmıştır. Down regulation droop (*ddn*) parametresi sıfırdan farklı bir değer verildiğinde frekansın artmasına, up regulation droop (*dup*) frekansın azalmasına PV santralin aktif güç tepkisi vermesini sağlar. *frqflg* bayrağın 1 seçildiğinde bu parametreler aktif hale gelmektedir.

Ayrıca, aktif güce etki eden iki özellik bulunmaktadır. Bunlardan ilki, düşük gerilim iyileştirme (low voltage ride through – LVRT) özelliği geçici olay anında PV santralin sisteme aktif güç desteği sağlamasını gerçekleştirir [25]. Bu çalışmada LVRT'nin devrede olduğu gerilim büyüklüğünün limit değerleri 0,9 pu ile 0,6 pu arasındadır. Gerilim büyüklüğü 0,6 pu değerinden aşağı inerse PV santral sisteme aktif güç vermeyi keser, 0,9 pu değerinin üstüne çıkarsa da normal çalışma koşullarına geçilir. Bu limitlerin ayarlanabilmesini sağlayan REGC_A modülünde bulunan *breakpoint* (*brkpt*=0,9 pu) ve *zero crossing* (*zerox*=0,6 pu) parametreleridir. Aktif güce etki eden ikinci özellik de gerilim düzeldiğinde aktif güç rampalama oranıdır [26]. Bu çalışmada PV santral saniyede nominal aktif gücünün %100'ü oranında aktif gücünü artırarak geçici olay öncesi değerine geri döner. Bu aktif güce geri dönme oranı REGC_A modülünde bulunan aktif güç rampalama oranı (*rrpwr*=1 pu) parametresiyle düzenlenir. Ayrıca bu çalışmada PV santralde dinamik gerilim desteği (dynamic voltage support – DVS) özelliği kullanılmamıştır.

Bu çalışmada adil bir AGKY karşılaştırılması yapmak için aynı tepkiyi veren reaktif güç kontrol yöntemleri dikkate alınmıştır. Bu yüzden sadece lokal kontrol modülü (REEC_B) içeren NGR aktif güç kontrol yöntemi PV santralinde reaktif güç kontrol yöntemi Local Voltage Control (LVC) kullanılmıştır. Santral seviyesinde kontrol modülü (REPC_A) içeren GRDR ve GRU&DR aktif güç kontrol yöntemi PV santrallerde ise Plant level Voltage Coontrol & Local Coordinated Q/V Control (PLVC&LCQ/VC) reaktif güç kontrol yöntemi kullanılmıştır.

Bu çalışmada yukarıda verilen parametre değerlerinin dışında kalan PV santral kontrol modüllerinin parametreleri [26]'dan alınmıştır.

3. Uygulanan Senaryolar ve Benzetim Çalışmaları

Güç sistemlerinde genellikle meydana gelen geçici olaylar bu çalışmada senaryo olarak gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen senaryolar Tablo 4'te sunulmaktadır.

Tablo 4. Dikkate Alınan Senaryolar

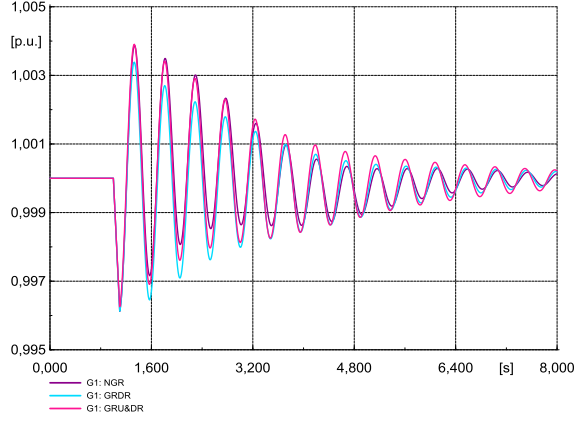
Senaryo	Geçici Olay	Geçici Olay Yeri
I	Generatörün Anlık Devreden Çıkması	G2
II	Yükün Anlık Devreden Çıkması	Yük A Yük C
III	Hattın Anlık Devreden Çıkması	Hat 5-7 Hat 6-9
IV	Anlık 3 Faz Kısa Devre Arızası	Bara 5 Bara 6

Tabloda verilen senaryolarda Senaryo I haricinde diğer alt durum bulunmaktadır. Bu durumların sebebi PV santrale yakın ve uzak konumda olan aynı geçici olayların karşılaştırılması içindir. Bu noktada, PV santrallerin yakında ve uzakta olan geçici olaylara AGKY'nin tepkisi ve kontrol birimlerinin etkisi incelenmiştir.

Bu çalışmada geçici olaylar t=1 s başlamış olup t=1,1 s de sonlanmıştır. Ayrıca frekans tepkisi Bara 9 üzerinden incelenmiştir.

3.1. Senaryo I: Generatörün Anlık Devreden Çıkması

Güç sisteminde generatörün devreden çıkmasıyla meydana gelecek üretim kaybını dengelemek için sistemde bulunan diğer generatörler üretimlerini arttırmalı ya da bu duruma sistemden yük atılarak karşılık verilmelidir. Burada gerçekleşen olayda G2 generatörü geçici olarak devreden çıkarılmaktadır. G2 generatörünün devreden çıkması sonucunda G1 generatörünün rotor hızındaki değişim Şekil 4'te verilmiştir.

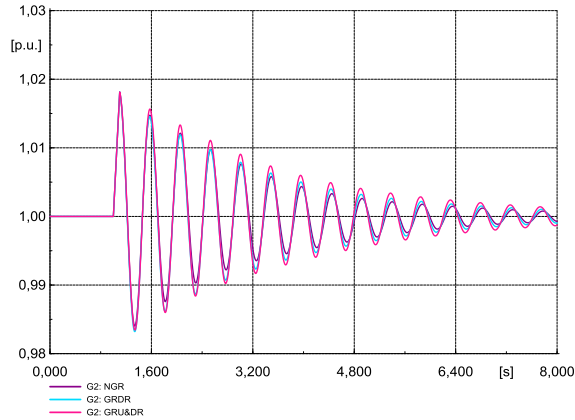


Şekil 4. G2 Generatörünün Devreden Çıkmasıyla Elde Edilen G1 Generatörünün Rotor Hızı

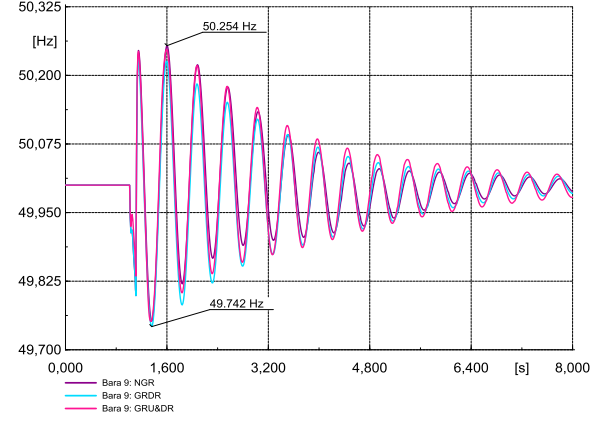
Şekil 4'te G1 generatörünün rotor hızının azaldığı görülmektedir. Üretim talebi karşılanmadığı için bu sonuç ortaya çıkmıştır. Burada gerçekleşen geçici olayın başlangıcında PV santral AGKY'ne, G1 generatörünün rotor hızının verdiği tepki çok yakındır. Daha sonra bu rotor hızında oluşan salınımlara bakıldığında ise salınım genliğinin büyükten küçüğe doğru sıralanması GRU&DR, GRDR ve NGR'dir. Şekil 7'de görüldüğü üzere kontrol yöntemlerinde PV santralin frekans değişikliğine verdiği aktif güç tepkisinin artması rotor hızında salınımı arttırdığı görülmektedir.

Şekil 5'te G2 generatörünün devreden çıkmasıyla bu generatörün rotor hızında meydana gelen tepki verilmiştir. Şekil 5'te görüldüğü üzere G2 generatörü sistemden ayrılmasıyla bu generatör yüksüz kalmış ve rotor hızında artış meydana gelmiştir. Bu şekilde başlangıçta PV santral AGKY'ne göre G2 generatörünün rotor hızında meydana gelen tepki benzerdir. Fakat, daha sonra salınımda farklılıklar meydana gelmiştir. Bu salınının kontrol yöntemlerine göre davranışı G1 generatöründeki gibi olmuştur.

Bu senaryo sonucunda Bara 9'da oluşan frekans tepkisi Şekil 6'da verilmiştir. Frekans tepkisine bakıldığında G1 ve G2 generatörünün rotor hızında olan salınımların frekansa yansdığı görülmektedir. Yani AGKY'nin salınım genliğinin büyükten küçüğe doğru sıralanması burada da GRU&DR, GRDR ve NGR yöntemlerinde gerçekleşmiştir.

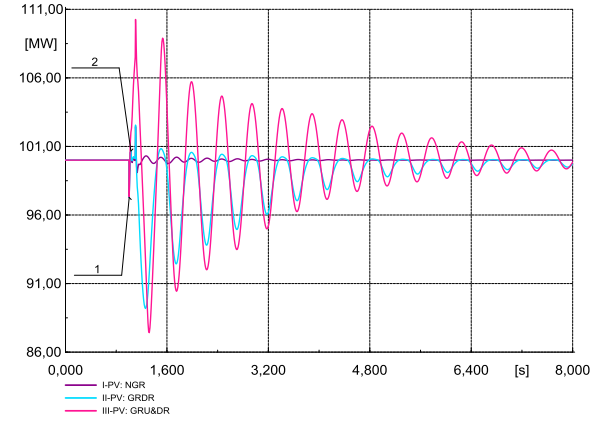


Şekil 5. G2 Generatörünün Devreden Çıkmasıyla Elde Edilen G2 Generatörünün Rotor Hızı



Şekil 6. G2 Generatörünün Devreden Çıkmasıyla Oluşan Bara 9'da Oluşan Frekans Tepkisi

Şekil 7'de G2 generatörünün devreden çıkmasıyla PV santralin aktif güç tepkisi verilmiştir.



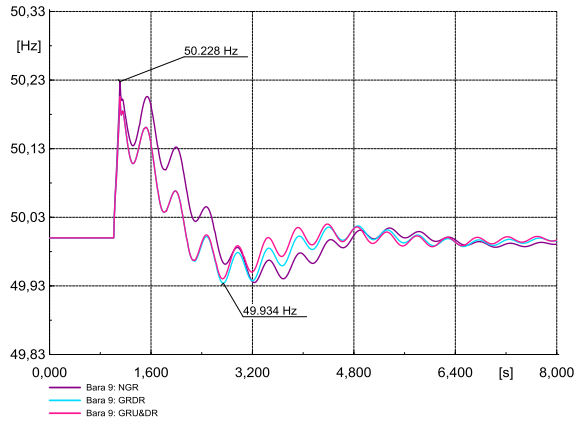
Şekil 7. G2 Generatörünün Devreden Çıkmasıyla Elde Edilen PV Santralin Aktif Güç Tepkisi

Şekil 7'ye bakıldığında sistemde iki nokta göze çarpmaktadır. Birincisi PV santralin sağladığı aktif güç değeri, kontrol yöntemlerinde, başlangıçta düştüğü (1. durum, Şekil 7) daha sonra ise yükseldiği (2. durum, Şekil 7) görülmektedir. Burada aktif güçte oluşan yükselmenin sebebi PV santralin bağlandığı barada meydana gelen gerilim değerinin yükselmesidir. İkincisi ise kontrol yöntemlerinden beklenen tepkinin verilmiş olmasıdır. Yani NGR kontrol yöntemi PV santralin frekansa tepki vermemesi, GRDR kontrol yöntemi PV santralin frekans yükseldiğinde tepki vermesi ve GRU&DR kontrol yöntemi PV santralin frekans yükselmesine ve azalmasına tepki vermesidir. Ayrıca GRU&DR kontrol yöntemi PV santralde aktif güç GRDR kontrol yöntemi PV santrale göre daha fazla azalmıştır. Bunun sebebi, GRU&DR kontrol yönteminin frekansın daha çok artmasına neden olması ve bu yükselen frekansı düşürmek için aktif gücü daha çok azaltması gereksinimindedir.

3.2. Senaryo II: Yükün Anlık Devreden Çıkması

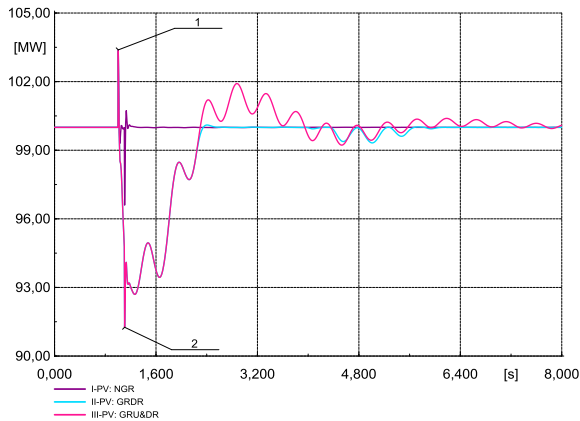
Güç sistemlerinde yükün aniden devreden çıkması sistemde frekansın artmasıyla sonuçlanır. Bunun sebebi, yükün devreden çıkmasıyla generatörlerden talep edilen aktif gücün üretilenden az olmasıdır. Talebin dengelemesi için generatörler üretimini düşürmelidir.

Yük A'nın devreden çıkması durumunda frekans tepkisi Şekil 8'e ve aktif güç tepkisi Şekil 9'da verilmiştir. Yük C'nin devreden çıkması durumunda frekans tepkisi ise Şekil 10'da ve aktif güç tepkisi Şekil 11'de verilmiştir.

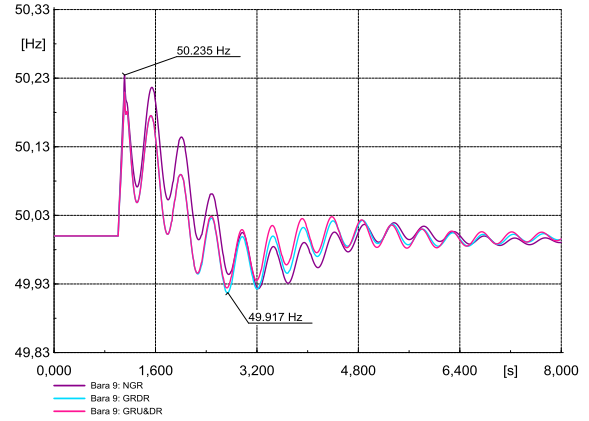


Şekil 8. Yük A'nın Devreden Çıkmasıyla Bara 9'da Oluşan Frekans Tepkisi

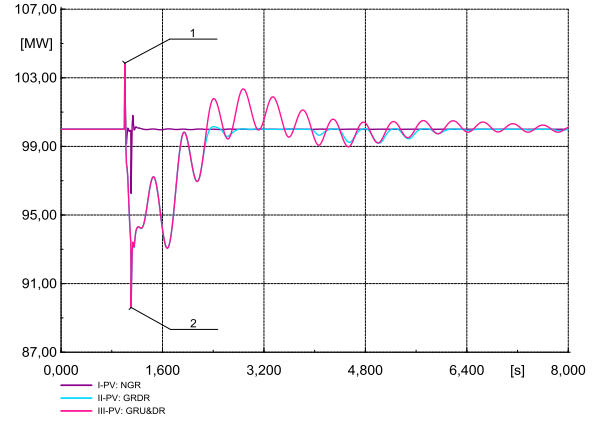
PV santrale yakın ve uzak konumda bulunan her iki yükünde devreden çıkmasıyla oluşan frekans ve aktif güç tepkilerinin benzer olduğu görülmektedir. Her iki durumda da PV santral geçici olayın başlangıcında (1. durum, Şekil 11) aktif güç üretimini arttırmıştır. Bunun sebebi bağlı olduğu barada gerilim artışının yaşanmasıdır. Ayrıca Şekil 9,11'de görüldüğü üzere Şekil 8,10'daki frekansın artışını dengelemek için PV santralde kullanılan aktif güç kontrol yöntemlerinden GRDR ve GRU&DR devreye girmiş ve santral aktif güç üretimini azaltmıştır (2. durum, Şekil 11). Bu kontrol yöntemlerinin frekansa olumlu etki yaptığı Şekil 8,10'da görülmektedir. Frekans nominal değerinin altına düşmediği sürece bahsi geçen iki kontrol yönteminde birlikte hareket etmektedir.



Şekil 9. Yük A'nın Devreden Çıkmasıyla Elde Edilen PV Santralin Aktif Güç Tepkisi



Şekil 10. Yük C'nin Devreden Çıkmasıyla Bara 9'da Oluşan Frekans Tepkisi

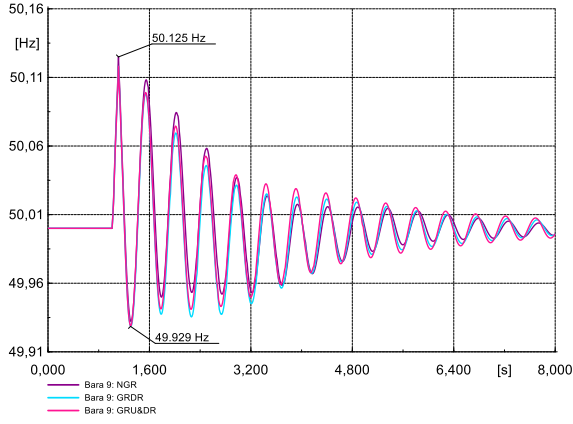


Şekil 11. Yük C'nin Devreden Çıkmasıyla Elde Edilen PV Santralin Aktif Güç Tepkisi

Frekans tepkileri incelendiğinde arada oluşan fark daha çok Yük A'nın ve Yük C'nin konumundan kaynaklanmıştır. Bunun sebebi Yük A'nın beslenmesinde Şekil 2'de görüldüğü üzere G1 ve G2 generatörünün, Yük C'nin beslenmesinde ise G2 ve PV generatörün rol oynamasıdır. Bu durum, Yük C'nin aktif güç değerinin Yük A'dan daha az olmasına rağmen Yük C'nin devreden çıkmasıyla frekanstaki yükselmenin daha fazla artmasına sebep olmuştur.

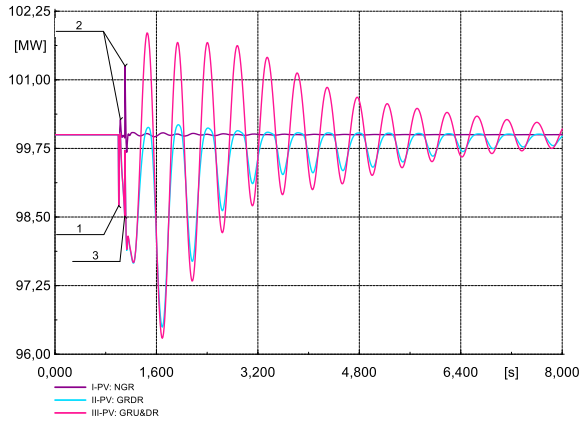
3.3. Senaryo III: Hattın Anlık Devreden Çıkması

Hattın devreden çıkması güç sistemlerinde hattın konumuna göre farklı dinamik etkilere yol açabilir. Bunun sebebi hatta gerçekleşen güç akışı durumudur. Şekil 12'de Hat 5-7'nin devreden çıkmasıyla oluşan frekans tepkisi verilmiştir.



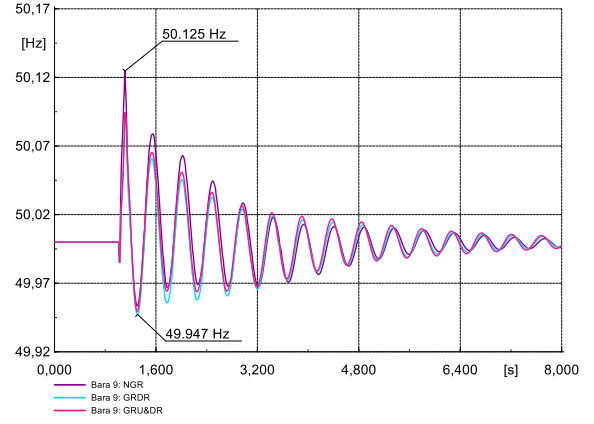
Şekil 12. Hat 5-7'nin Devreden Çıkmasıyla Bara 9'da Oluşan Frekans Tepkisi

Yük A'yı Şekil 2'de G1 ve G2 generatörlerinin beslediği görülmektedir. Bu yüzden Hat 5-7'nin devreden çıkmasıyla G1 generatöründen talep edilen aktif güç artmış ve bu generatörün rotor hızında azalma olmuştur. G2 generatöründe ise tam tersi gerçekleşmiştir. Şekil 13'de Hat 5-7'nin devreden çıkmasıyla oluşan aktif güç tepkisi verilmiştir.



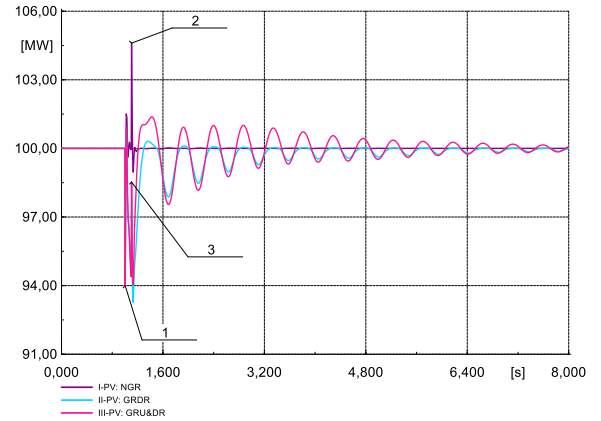
Şekil 13. Hat 5-7'nin Devreden Çıkmasıyla Elde Edilen PV Santralin Aktif Güç Tepkisi

Şekil 13'te görülen geçici olay başlangıcındaki durum PV santralin bağlı olduğu barada yaşanan gerilim düşümünün aktif güç üretimini (1. durum, Şekil 13) azaltmasıdır. Daha sonra frekansa göre tepki vermeyen NGR kontrol yöntemi PV santral, baradaki gerilim yükselişine aktif güç üretimini (2. durum, Şekil 13) arttırarak tepki vermiştir. Frekansın yükselmesini engellemeye çalışan kontrol yöntemleri GRDR ve GRU&DR'nin bulunduğu PV santral, geriliminde toparlanmasıyla, aktif güç üretimini (3. durum, Şekil 13) düşürerek tepki vermiştir. Şekil 14'te Hat 6-9'un devreden çıkmasıyla oluşan frekans tepkisi verilmiştir.



Şekil 14. Hat 6-9'un Devreden Çıkmasıyla Bara 9'da Oluşan Frekans Tepkisi

Yük B'yi Şekil 2'de G1 ve PV generatörlerinin beslediği görülmektedir. Hat 6-9'un devreden çıkmasıyla PV santralin güç akışı Hat 8-9 üzerine yönelmiştir. Bu yüzden G1 generatöründen talep edilen aktif güç artmış, G2 generatöründen talep edilen aktif güç azalmıştır. Şekil 15'te Hat 6-9'un devreden çıkmasıyla oluşan aktif güç tepkisi verilmiştir.

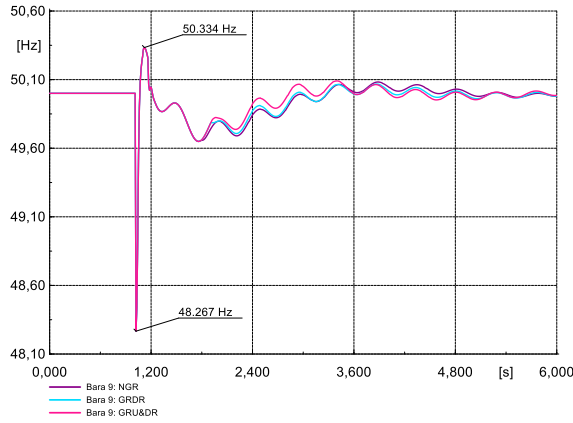


Şekil 15. Hat 6-9'un Devreden Çıkmasıyla Elde Edilen PV Santralin Aktif Güç Tepkisi

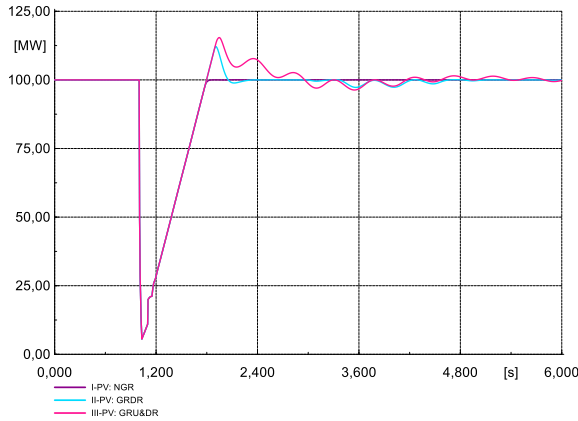
PV santralin bağlı olduğu barada geçici olay başlangıcında gerilim düşüşü yaşanmış ve bu üç kontrol yöntemi PV santralinde aktif güç üretiminin (1. durum, Şekil 15) azalmasına sebep olmuştur. Burada Şekil 15'te göze çarpan, geçici olayın başlangıcından çok kısa süre sonra PV santralin bağlı bulunduğu barada gerilim yükselmesinden dolayı tüm kontrol yöntemlerinde PV santralin aktif güç üretiminin (2. ve 3. durum, Şekil 14) artmasıdır. PV santralin bağlı olduğu barada gerilim nominal değerler civarında gezdikçe yükselen frekansı düşürmek için GRDR ve GRU&DR kontrol yöntemi PV santrallerin aktif güçlerini azalttığı görülmektedir. Ayrıca, Hat 6-9'daki durumda Hat 5-7'deki duruma göre GRDR ve GRU&DR kontrol yöntemi PV santralin frekansa etkisinin daha çok olduğu Şekil 12 ve 14 karşılaştırıldığında görülmektedir.

3.4. Senaryo IV: Anlık 3-Faz Kısa Devre Arızası

Güç sisteminde 3 faz kısa devre arızası meydana geldiğinde, generatörlerden talep edilen aktif güç miktarının büyük ölçüde azalmasıyla üretim-talep dengesizliği ortaya çıkar ve frekansta yükseliş meydana gelir. Fakat, arıza başlangıcında güç sisteminde yüksek penetrasyon seviyesinde (%33,3) bulunan PV santrallerin LVRT ayarları sistemin frekansında düşüşe yol açabilir. Şekil 16 ve 17'de Bara 5'te 3 faz kısa devre arızası oluşmasının sonucunda frekans ve aktif güç tepkisi verilmiştir.



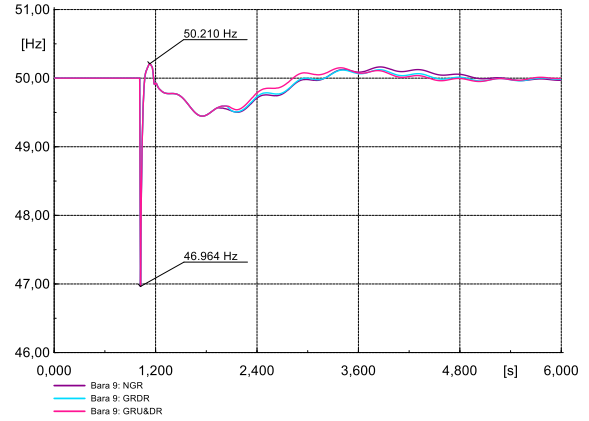
Şekil 16. Bara 5'te Oluşan 3 Faz Kısa Devre Arızası Sonucunda Bara 9'daki Frekans Tepkisi



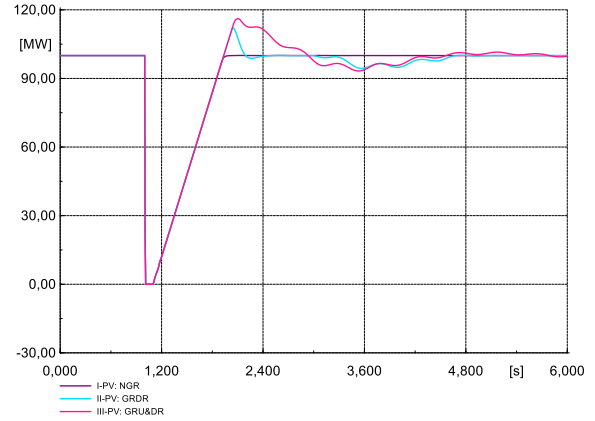
Şekil 17. Bara 5'te Oluşan 3 Faz Kısa Devre Arızası Sonucunda PV Santralin Aktif Güç Tepkisi

Bara 5'te gerçekleşen arıza sonucunda frekans tepkisinde arıza başlangıcında düşüş daha sonra ise frekansta yükseliş meydana geldiği Şekil 16'da açıkça görülmektedir. Bunun sebebi Şekil 17'de görüldüğü gibi PV santralin arıza başlangıcında sisteme sağladığı aktif güç desteğini aşırı düşürmesidir.

Şekil 18 ve 19'da Bara 6'da 3 faz kısa devre arızası oluşmasının sonucunda frekans ve aktif güç tepkisi verilmiştir.



Şekil 18. Bara 6'da Oluşan 3 Faz Kısa Devre Arızası Sonucunda Bara 9'daki Frekans Tepkisi



Şekil 19. Bara 6'da Oluşan 3 Faz Kısa Devre Arızası Sonucunda PV Santralin Aktif Güç Tepkisi

Bara 6'da oluşan kısa devre arızası sonucunda frekans tepkisi Bara 5'te oluşan arıza sonucunda ortaya çıkan tepkiyle benzerlik gösterdiği Şekil 16 ve 18'de görülmektedir. Burada kontrol yöntemlerinin arıza geçtikten sonra PV santralin arıza öncesi işletme gücüne geri dönmesiyle etkili olduğu tespit edilmiştir.

PV santral Şekil 17'de ve Şekil 19'de arıza boyunca farklı aktif güç desteği sağladığı görülmektedir. Bunun sebebi arızaya yakın yerlerde daha çok gerilim düşmesi PV santralin LVRT özelliğini etkilemesinden kaynaklanmaktadır. Bara 5'te oluşan arıza sonucunda PV santralin bağlı olduğu barada gerilim büyüklüğünün değeri arıza başlangıcında 0,51 pu değerine düşmüş daha sonra toparlanarak arıza boyunca ortalama 0,66 pu değerlerinde kalmıştır. Bara 6'da oluşan arıza sonucunda ise PV santralin bağlı olduğu barada gerilim büyüklüğünün değeri arıza başlangıcında 0,37 pu değerine düşmüş daha sonra toparlanarak arıza boyunca ortalama 0,47 pu değerlerinde kalmıştır.

LVRT'nin devrede olduğu minimum değer bu çalışmada 0,6 pu olarak belirlenmişti. Bu değer Bara 6 kısa devre arızası durumunda aşılması, arıza boyunca PV santralin hiç aktif güç üretmemesine neden olmuştur. Fakat, Bara 5'te meydana gelen

kısa devre arızası durumunda PV santral sisteme arıza boyunca aktif güç desteği sağlamıştır. Ayrıca, PV santrale daha uzak konumdaki arızada Bara 9'daki frekans düşüşünü bu durumdaki aktif güç desteği kısıtlamıştır.

Ayrıca, Şekil 16 ve 18'de frekansta aşmanın olduğu görülmektedir. Buradaki frekans aşımalarında PV santralin LVRT ve rampalama özelliğinin etkisi vardır.

4. Sonuçlar

Güç sistemlerinde PV santraller, frekansı düzenlemek için tercih edilmemektedir. Fakat PV santrallerin artan penetrasyon seviyeleriyle güç sistemlerinde frekans kontrolüne katılma gerekliliği doğmaktadır. Bu sebeple, bu çalışmada PV santralin frekansa tepki olarak aktif gücünü değiştirdiği ve değiştirmedikleri durumlar incelenmiştir. Farklı aktif güç kontrol yöntemli PV santral karşılaştırılması yapılarak frekans üzerinden değerlendirilmiş ve aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

- Generatörün devreden çıktığı senaryoda, PV santralin sağladığı aktif gücün salınımsız olması (NGR) daha olumlu bir sonuç vermesine sebep olmuştur. Fakat bu senaryoda kontrol yöntemleri frekans üzerinde benzer sonuçlar verdiği görülmüştür.
- Yükün devreden çıktığı senaryoda, GRDR ve GRU&DR kontrol yöntemli PV santralin, NGR yöntemli PV santralden daha iyi sonuç verdiği ortaya çıkmıştır. Ayrıca yüklerin büyüklüklerinden daha çok konumlarının frekans üzerinde etkili olduğu anlaşılmıştır.
- Hattın devreden çıktığı senaryoda, frekans kontrolü gerçekleştiren yöntemlerin Hat 6-9'daki durumda Hat 5-7'deki duruma göre daha etkin olduğu görülmüştür. Ayrıca, başlangıçta Hat 6-9 GRDR ve GRU&DR kontrol yöntemli durumda frekansın Hat 5-7'deki duruma göre aşımı daha azdır.
- 3 faz kısa devre senaryosunda, PV santralin aktif güç üretiminin çok fazla düşmesi sonucunda frekansın da düştüğü görülmektedir. Ayrıca, gerilim düşümüne göre PV santralin bağlı olduğu barada santrale yakın konumda gerçekleşen arıza boyunca LVRT özelliğinin devreye girmediği yani aktif güç üretiminin sıfır olduğu tespit edilmiştir.

Sonuç olarak aktif güç kontrol yöntemleri frekans kararlılığı açısından analiz edildiğinde GRDR kontrol yöntemli PV santralin güç sisteminde kullanılmasının daha uygun olduğu görülmüştür. Çünkü Bara 9'daki frekans tepkilerinin bazı senaryolarda birbirine yakın olması, frekans düşüşü olayının güç sistemlerinde daha çok yaşanması ve ekonomik olarak PV santrallerin maksimum güçte çalışması gereksinimindedir. Ayrıca, GRDR ve GRU&DR kontrol yöntemli PV santralin frekansa etkisi daha belirgin biçimde Senaryo II'den ve Senaryo III'teki Hat 6-9 durumundan görülmektedir.

Bu çalışmada göz ardı edilmemesi gereken noktalardan biri de PV santralin penetrasyon seviyesidir. PV santralin penetrasyon seviyesi arttıkça frekansa göre gücünü değiştirebilen kontrol yöntemli PV santrallerin önemi artacaktır. Ayrıca göz ardı

edilememesi gereken ikinci bir nokta ise PV santralin frekansa tepki veren kontrol yöntemlerinde aktif güç değişikliğinde daha esnek olabilmemesine izin vermenin frekansa daha fazla etki edeceğidir. Bu konular farklı bir çalışmada incelenebilir.

Kaynaklar

- [1] N. L. Panwar, S. C. Kaushik, and S. Kothari, "Role of renewable energy sources in environmental protection: A review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, pp. 1513-1524, April 2011, doi: 10.1016/j.rser.2010.11.037
- [2] J. Dajun, Z. Lei, Z. Dawei, C. Ning and Q. Minhui, "Research on PV Generation Participating in Power Grid Frequency Regulation," 2018 China International Conference on Electricity Distribution (CICED), Tianjin, 2018, pp. 1713-1717, doi: 10.1109/CICED.2018.8592122.
- [3] M. Sun and Q. Jia, "A Novel Frequency Regulation Strategy for Single-Stage Grid-Connected PV Generation," 2018 2nd IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), Beijing, 2018, pp. 1-6, doi: 10.1109/EI2.2018.8582246.
- [4] A. Etxegarai, P. Eguia, E. Torres, A. Iturregi and V. Valverde, "Review of grid connection requirements for generation assets in weak power grids." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 41, pp. 1501-1514, January 2015, doi: 10.1016/j.rser.2014.09.030.
- [5] B. Crăciun, T. Kerekes, D. Séra and R. Teodorescu, "Frequency Support Functions in Large PV Power Plants With Active Power Reserves," in *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 2, no. 4, pp. 849-858, Dec. 2014, doi: 10.1109/JESTPE.2014.2344176.
- [6] P. Yang et al., "Research on Primary Frequency Regulation Control Strategy of Wind-thermal Power Coordination," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 144766-144776, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2946192.
- [7] O. Awedni, A. Masmoudi and L. Krichen, "Power Control of DFIG-Based Wind Farm for System Frequency Support," 2018 15th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD), Hammamet, 2018, pp. 1298-1304, doi: 10.1109/SSD.2018.8570400.
- [8] V. Gholamrezaie, M. G. Dozein, H. Monsef and B. Wu, "An Optimal Frequency Control Method Through a Dynamic Load Frequency Control (LFC) Model Incorporating Wind Farm," in *IEEE Systems Journal*, vol. 12, no. 1, pp. 392-401, March 2018, doi: 10.1109/JSYST.2016.2563979.
- [9] F. Wei, S. Kai, Y. Guan and Y. Wang, "A novel frequency restoring strategy of hydro-PV hybrid microgrid," 2014 International Power Electronics and Application Conference and Exposition, Shanghai, 2014, pp. 348-353, doi: 10.1109/PEAC.2014.7037880.
- [10] V. A. K. Pappu, B. Chowdhury and R. Bhatt, "Implementing frequency regulation capability in a solar photovoltaic power plant," *North American Power Symposium 2010*, Arlington, TX, 2010, pp. 1-6, doi: 10.1109/NAPS.2010.5618965.
- [11] Y. Kimpara, M. Kurimoto, Y. Manabe, T. Funabashi and T. Kato, "An Experimental Study on Active Power Control of Photovoltaic Power Generation for Supporting Grid Frequency Regulation," 2018 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM), Portland, OR, 2018, pp. 1-5, doi: 10.1109/PESGM.2018.8586244.
- [12] D. Zhao, M. Qian, J. Ma, D. Jiang, M. Ding and L. Xiang, "A Decentralized Frequency Regulation Strategy of PV Power Plant Based on Droop Control," 2018 China International Conference on Electricity Distribution

- (CICED), Tianjin, 2018, pp. 1824-1828, doi: 10.1109/CICED.2018.8592133.
- [13] M. Qian, D. Zhao, J. Ma, D. Jiang, M. Ding and L. Xiang, "A Centralized Frequency Regulation Strategy of PV Power Plant Based Equal Adjustable Capacity Proportion Mode," 2018 China International Conference on Electricity Distribution (CICED), Tianjin, 2018, pp. 1797-1801, doi: 10.1109/CICED.2018.8592563.
- [14] X. Zhang, Q. Gao, Y. Hu, H. Zhang and Z. Guo, "Active power reserve photovoltaic virtual synchronization control technology," in Chinese Journal of Electrical Engineering, vol. 6, no. 2, pp. 1-6, June 2020, doi: 10.23919/CJEE.2020.000006.
- [15] A. F. Hoke, M. Shirazi, S. Chakraborty, E. Muljadi and D. Maksimovic, "Rapid Active Power Control of Photovoltaic Systems for Grid Frequency Support," in IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, vol. 5, no. 3, pp. 1154-1163, Sept. 2017, doi: 10.1109/JESTPE.2017.2669299.
- [16] S. You et al., "Energy Storage for Frequency Control in High Photovoltaic Power Grids," IEEE EUROCON 2019 -18th International Conference on Smart Technologies, Novi Sad, Serbia, 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/EUROCON.2019.8861993.
- [17] U. Datta, A. Kalam and J. Shi, "Battery Energy Storage System Control for Mitigating PV Penetration Impact on Primary Frequency Control and State-of-Charge Recovery," in IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol. 11, no. 2, pp. 746-757, April 2020, doi: 10.1109/TSTE.2019.2904722.
- [18] F. Jibji-Bukar and O. Anaya-Lara, "Frequency support from photovoltaic power plants using offline maximum power point tracking and variable droop control," in IET Renewable Power Generation, vol. 13, no. 13, pp. 2278-2286, 7 10 2019, doi: 10.1049/iet-rpg.2019.0211.
- [19] H. Saadat, "Stability" in Power System Analysis, New Delhi, Tata McGraw Hill Publishing Company, 2002.
- [20] J. Machowski, Z. Lubosny, J. W. Bialek and J. R. Bumby, "Frequency Stability and Control" in Power System Dynamics: Stability and Control, John Wiley & Sons, 2020.
- [21] P. M. Anderson, and A. A. Fouad, "Power System Control and Stability" Wiley-IEEE Press, 2003.
- [22] DigSILENT, "Digsilent Powerfactory," 2020.
- [23] WECC Renewable Energy Modeling Task Force, "Central station photovoltaic power plant model validation guideline" March 2015. [Online]. Available: [https://www.wecc.org/Reliability/150318 WECC Pv Plant Model Val Guide Rev2.pdf](https://www.wecc.org/Reliability/150318%20WECC%20Pv%20Plant%20Model%20Val%20Guide%20Rev2.pdf)
- [24] WECC Renewable Energy Modeling Task Force, "WECC solar PV dynamic model specification" September 2012. [Online]. Available: [https://www.wecc.org/Reliability/WECC Solar PV Dynamic Model Specification - September 2012.pdf](https://www.wecc.org/Reliability/WECC%20Solar%20PV%20Dynamic%20Model%20Specification%20-%20September%202012.pdf)
- [25] Y. Yang, F. Blaabjerg and H. Wang, "Low-Voltage Ride-Through of Single-Phase Transformerless Photovoltaic Inverters," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 50, no. 3, pp. 1942-1952, May-June 2014, doi: 10.1109/TIA.2013.2282966.
- [26] G. Lammert, Modelling, "Control and Stability Analysis of Photovoltaic Systems in Power System Dynamic Studies" Energy Management and Power System Operation vol. 9. Kassel Univ. Press GmbH, 2019.

Bora ÇAVDAR



Bora ÇAVDAR, Trabzon doğumludur. Lisans eğitimini 2018 yılında, yüksek lisans eğitimini de 2021 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümünde tamamlamıştır. Doktora eğitimine 2021 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümünde başlayıp eğitimine devam etmektedir. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Of Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği bölümünde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktadır.

Ömür AKYAZI



Ömür AKYAZI, Trabzon doğumludur. Lisans eğitimini 2003 yılında Fırat Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Elektrik Eğitimi bölümünde tamamlamıştır. Yüksek lisans eğitimini 2006 yılında, doktora eğitimini de 2015 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümünde tamamlamıştır. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Of Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği bölümünde Dr. Öğr. Üyesi olarak görev yapmaktadır.

Erdinç ŞAHİN



Erdinç ŞAHİN, Giresun doğumludur. Lisans eğitimini 2009 yılında Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümünde tamamlamıştır. 2011 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği bölümünde yüksek lisans eğitimini tamamlamıştır. Doktora derecesini 2017 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümünde almıştır. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Of Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği bölümünde Dr. Öğr. Üyesi olarak görev yapmaktadır.

Fatih Mehmet NUROĞLU



Fatih Mehmet NUROĞLU, Trabzon doğumludur. Lisans eğitimini 1992 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Fakültesi Elektrik Mühendisliği bölümünde tamamlamıştır. 1997 yılında Pennsylvania State Üniversitesinde Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümünde tamamlamıştır. Doktora derecesini 2011 yılında Kocaeli Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümünde almıştır. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümünde Dr. Öğr. Üyesi olarak görev yapmaktadır.

Türkiye'de Kullanılan Yenilenebilir Enerji Sertifika Sistemlerinin Değerlendirilmesi

Evaluation of Renewable Energy Certificate Schemes in Turkey

Mustafa Özcan¹, Burcu Ergün², Elif Ocaklı³



¹ Kocaeli Üniversitesi, Elektrik ve Enerji Bölümü, Kartepe, Kocaeli, Türkiye
mustafa.ozcan@kocaeli.edu.tr

² Kocaeli Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmit,
Kocaeli, Türkiye burcuergun94@gmail.com

³ Kocaeli Üniversitesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü,
İzmit, Kocaeli, Türkiye elifocakli96@gmail.com

Öz

Elektrik sektöründe kullanılan piyasa temelli mekanizmalardan biri olan yenilenebilir enerji sertifikaları (YES), elektrik tüketicisine kullandıkları elektriğin yenilenebilir enerji kaynakları (YEK) kullanılarak üretildiğini kanıtlayan, elektronik ortamda düzenlenen sertifikalardır. Bu sertifikaların kullanımı ile elektrik üretimi kaynaklı emisyonlar azalacak, YEK kullanımı artacak ve YEK kullanarak elektrik üretimi yapan tesis işletmecileri ek gelir elde edecektir.

Bu çalışmada farklı YES sistemleri ile Türkiye'de uygulanan sertifika sistemleri incelenmiştir. Çalışma kapsamında Türkiye'nin YES potansiyeli, ülkenin elektrik tüketim verilerine göre hesaplanmıştır. Yapılan hesaplama göre Türkiye'nin YES potansiyeli 70.185.955,35 MWh'dır. Günümüzde mevcut potansiyelin yaklaşık %0,72'sinden YES oluşturulmaktadır.

Türkiye'de Uluslararası Yenilenebilir Enerji Sertifikaları (I-REC) sistemine entegre biçimde YES ihraç ve ifası gerçekleştirilmektedir. Türkiye'de gerçekleştirilen YES ifaları genellikle küresel şirketlerin yurtdışındaki karar merkezleri tarafından talep edilmektedir. Türkiye YES piyasası, yeni santrallerin kayıtlarının yapılmasıyla genişlemektedir. 2020 yılında yayımlanan Yenilenebilir Enerji Kaynak Garanti Belgesi (YEK-G) yönetmeliği ile ulusal YES sistemi kurulmuş olacaktır. Enerji Piyasaları İşletme Anonim Şirketi tarafından işletilecek organize YEK-G piyasasının, uluslararası bir standarda bağlı olarak işletilmesi sağlanmalıdır.

Anahtar kelimeler: İklim Değişikliği, Sürdürülebilirlik, Yenilenebilir Enerji Politikaları, Yenilenebilir Enerji Sertifikaları, Yenilenebilir Enerji Sertifika Piyasaları

Abstract

Renewable Energy Certificates (RECs) are electronically issued market-based instruments that represent attributes of 1 MWh electricity generated from renewable energy sources (RES). They prove the attributes of RES to electricity

consumers. With using these certificates, emission that as a result of electricity production will decrease. In addition, RES's tenacy will rise and it will led to additional income for RES-based power plants' operators.

In this study, different REC systems and certificate systems applied in Turkey were examined. As part of the study, Turkey's REC potential was calculated according to the country's electricity consumption data. According to the calculation, Turkey's REC potential is 70.185.955.35 MWh. Currently, REC is generated from about 0.72% of the current potential.

In Turkey, RECs are issued and redeemed integrated into the International Renewable Energy Certificates (I-REC) system. RECs redemption performed in Turkey is usually requested by decision centers of global companies abroad. The Turkish REC market is expanding with the registration of new power plants. The National REC system will be established with the Renewable Energy Source Guarantee Certificate (YEK-G) regulation published in 2020. The organized YEK-G market, which will be operated by the Turkish Energy Exchange, must be operated according to an international standard.

Keywords: Climate Change, Sustainability, Renewable Energy Policies, Renewable Energy Certificates, Renewable Energy Certificate Markets

1. Giriş

Son yıllarda ciddi artış gösteren küresel ısınmanın başlıca sebebi sera gazı emisyonlarıdır. Dünya genelinde yaşanan sera gazı emisyon artışına paralel olarak Türkiye'nin toplam sera gazı emisyon değerleri de artış göstermektedir. Türkiye'nin 1990 yılında 219,4 milyon ton (Mt) karbondioksit (CO₂) eşdeğeri (eşd.) olan toplam sera gazı emisyon değeri, 2018 yılında 520,9 Mt CO₂ eşd.'ne yükselmiştir. Türkiye'nin kişi başı toplam sera gazı emisyon değeri 1990 yılında 4 ton CO₂ eşd. iken bu değer 2018 yılında, 1990 yılına göre %60 artarak 6,4 ton CO₂ eşd.'ne yükselmiştir [1]. Başta CO₂ emisyonu

olmak üzere, sera gazı emisyonlarının büyük bölümü enerji sektörü kaynaklıdır [2].

Türkiye'deki toplam sera gazı emisyonlarının yaklaşık %80'inini CO₂ emisyonları oluşturmaktadır [3]. 2018 yılı hane bazlı tüketimler haricindeki 451,3 Mt CO₂ eşd. sera gazı emisyonunun, 154,9 Mt CO₂ eşd.'lik kısmı elektrik sektöründen kaynaklanmıştır [4].

Türkiye, iklim değişikliği açısından önemli olan uluslararası sözleşmelere taraf olmuştur. Bu bağlamda; 2004 yılında Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (BMİDÇS)'ne, 2009 yılında ise Kyoto protokolüne (KP) taraf olmuştur. Türkiye, KP'nin kabul edildiği 1997 yılında BMİDÇS tarafı olmadığından; BMİDÇS EK-I ülkelerinin emisyon azaltım yükümlülüklerinin tanımlandığı KP'nin EK-B listesine dâhil edilmemiştir. Bu nedenle Türkiye'nin; KP'nin 2008-2012 yıllarını kapsayan birinci ve 2013-2020 yıllarını kapsayan ikinci taahhüt dönemleri için sera gazı emisyon azaltımı/sınırlandırması yükümlülüğü bulunmamaktadır [5].

Paris Anlaşması, 2015 yılında Fransa'da gerçekleştirilen 21. Taraflar Konferansı'nda kabul edilerek 2016 yılında resmen yürürlüğe girmiştir [6]. İklim değişikliği ile mücadelede bağlayıcılığı olan uluslararası bir anlaşma olan Paris Anlaşması'nın uzun dönem hedefi; küresel sıcaklık artışını sanayi öncesi döneme göre 2 C°, mümkünse 1,5 C° ile sınırlandırmaktır. Türkiye 22 Nisan 2016 tarihinde Paris Anlaşması'nı imzalamış ancak anlaşmaya henüz taraf olmamıştır. Anlaşmada ülkelerin her 5 yılda bir temel hedef doğrultusunda gerçekleştirdikleri faaliyetleri içeren "Ulusal Katkı Beyanlarını" sunmaları öngörülmüştür. Anlaşmaya taraf olmayan Türkiye, 30 Eylül 2015 Niyet Edilen Ulusal Katkı Beyanını BMİDÇS sekretermasına sunmuştur. Türkiye'nin sunduğu Niyet Edilen Ulusal Katkı Beyanında, yenilenebilir enerji kaynakları (YEK) alanında izlenecek politikalar ve hedefler belirlenmiştir. Beyana göre, Türkiye'nin 2030 yılında güneş enerjisinden elektrik üretimi kapasitesinin 10 GW'a, rüzgar enerjisinden elektrik üretim kapasitesinin ise 16,5 GW'a yükseltilmesi hedeflenmektedir [7].

Sera gazı emisyonları azaltım hedeflerinin sağlanması için piyasa temelli birçok mekanizma kullanılmaktadır. EK-B ülkeleri arasında uygulanan zorunlu karbon piyasaları; Emisyon Ticaret Sistemi, Temiz Kalkınma Mekanizması ve Ortak Yürütme Mekanizmasından oluşur [6,8]. Sera gazı emisyonlarının gönüllü olarak azaltılmasını ve dengelenebilmesini sağlamak amacıyla gönüllü karbon piyasaları kurulmuştur [9].

Yenilenebilir Enerji Sertifikaları (YES) elektrik enerjisi tüketimi kaynaklı emisyonları azaltmada kullanılan piyasa temelli bir araçtır. YES, şebekedeki bilgi asimetrisi sorunu olan YEK ve fosil kaynaklar kullanılarak üretilen elektrik enerjisinin ayırımına yardımcı olmak amacıyla, tüketicilere satın aldıkları yenilenebilir elektriğinin kaynağı ve niteliği hakkında bilgi verir [9,10]. Bu sayede YES'ler; çevreye duyarlı tüketicilere kullandıkları elektrik enerjisinin YEK kullanılarak üretildiğini ifşa etme imkânı sağlarlar.

Çok sayıda ülke; elektrik enerjisinin YEK kullanılarak üretildiğini kanıtlamak adına enerjinin menşecinin bildirilmesine yönelik yasal düzenlemeler getirmiştir. Bu amaçla, aynı amaca yönelik olarak farklı sertifika sistemleri kullanılmaktadır [11].

Sera gazı protokolünde (Greenhouse gas protocol) tanımlanan YES'ler, tüketicilerin YEK kaynaklı elektrik kullanımlarını belgeleyerek karbon saydamlık projesi (CDP) ve Yenilenebilir Enerji 100 (RE100) platformlarında karbon emisyonları kapsamında raporlama yapabilmelerine olanak sağlamaktadırlar [12,13].

Bu çalışma kapsamında Dünya'da kullanılan YES'ler araştırılarak, Türkiye'de uygulanan YES sistemleri değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında aşağıdaki sorulara cevap aranmıştır:

- Türkiye'nin YES ihraç potansiyelinin değeri nedir?
- Sahip olunan YES ihraç potansiyelin değerlendirilme durumu nedir?
- YES'lerin tercih edilme nedenleri nelerdir?
- YES'lerin kullanımının yaygınlaşması için neler yapılmalıdır?
- 2021 yılının ikinci yarısında uygulanmaya başlanacak olan Yenilenebilir Enerji Kaynak Garantisi (YEK-G) organize YES sisteminin uluslararası YES piyasalarına uyumu neden önemlidir?

Bu kapsam çerçevesinde çalışmanın ikinci bölümünde YES sistemi bulunan ülkelerde karşılaşılan sorunlar ve YES piyasalarının YEK sektörüne sağladığı katkılar incelenmiştir. Üçüncü bölümde Dünya'da uygulanan farklı YES tasarımları ve standartları incelenirken, dördüncü bölümde Türkiye'de uygulanan YES sistemleri, mevcut sertifika potansiyeli ve YES kullanımları incelenmiştir. Çalışmanın beşinci bölümünde yapılan çalışmaya bağlı olarak elde edilen sonuçlar tartışılmış, çalışmanın son bölümü olan altıncı bölümde ise Türkiye'de uygulanan YES sistemleri ve sahip olunan YES ihraç potansiyelinin daha aktif kullanımının sağlanması amacıyla öneriler sunulmuştur.

2. Literatür taraması

Literatür taraması kapsamında çeşitli ülkelerde uygulanan YES sistemlerini inceleyen çalışmalar incelenmiştir. Kore'de, Enerji Depolama Sistemleri (EDS) kuran firmalara YES düzenleme hakkı tanınarak ek bir gelir elde etmeleri sağlanmıştır. Jo ve Jang tarafından gerçekleştirilen çalışmada [14]; fotovoltaiik (FV) bağlantılı EDS'lerin durumu analiz edilerek, zorunlu Yenilenebilir Portföy Standartı (RPS) oranının her yıl artmasıyla birlikte, EDS pazarının büyük ilerleme sağladığı ve YES uygulanmasından itibaren geçen süre içerisinde %41'lik bir pazar payına ulaştığı belirlenmiştir. Zhang ve diğ. tarafından gerçekleştirilen çalışmada [15], YES piyasalarındaki siber saldırı gibi risklerin çözümü olarak blok zinciri uygulamasının kullanılmasının, sertifikaların ihraç ve düzenleme süreçlerini daha verimli ve şeffaf hale getireceği belirtilmiştir.

Tayvan için gerçekleştirilen çalışmada [16], Tarife Garantisi (FiT) politikalarının sertifika pazarlarını olumsuz etkileyebileceği belirtilmiştir. Tayvan yenilenebilir enerji sertifikaları (T-REC), YEK ile elektrik üretimini 2014-2017 yılları arasında 4,3 GWh'ten 1000 GWh'e yükseltirken, doğrudan satın alınan YEK kullanılarak üretilen elektrik enerjisi miktarı 4,2 GWh'ten 270 GWh'e yükselmiştir. Doğrudan satın alınan YEK kullanılarak üretilen elektrik enerjisi miktarındaki artışın, üretilen miktara göre düşük olmasının sebebi; üreticilerin yirmi yıl garantili teşvik aldıkları FiT politikasını daha karlı bulmaları, T-REC pazarlarını tercih etmemeleridir.

Adamczyk ve Raczyk tarafından gerçekleştirilen çalışmada [17], Polonya'nın Avrupa Birliği (AB)'ye katılımından bu yana uyguladığı YES politikası değerlendirilmiştir. Polonya'nın politikası, YEK kullanılarak üretilen bir birim elektriğe (1 kWh) karşılık bir menşe belgesi düzenlemeyi kapsamaktadır. Bu politika yenilenebilir enerji santrallerinin 2005 yılında 1158 MW olan kurulu gücünün 2016 yılında 7829 MW'a yükselmesine sebep olmuştur. 2016 yılından sonra sertifika fiyatlarında yaşanan yüksek dalgalanmalar yatırımcıların mali sıkıntıları yaşamasına sebep olmuştur. Yenilenebilir enerji üreticilerinin ilerleyen yıllar için YES biriktirmesi gibi dezavantajlar ise yenilenebilir enerji santralleri yatırımlarına ilgiyi azaltarak yatırım miktarlarının %50 düşmesine neden olmuştur.

Hulshof ve diğ. tarafından gerçekleştirilen çalışmada [9], Menşe Garantisi (GOs) sertifika sistemini kullanan 20 Avrupa ülkesinde sertifikasyon tasarımına bağlı olarak 2001-2016 yılları arasındaki YES pazarlarının müşteri kayıp oranı, fiyat değişkenliği, sertifikasyon oranı ve sertifika sürelerinin sona erme performansları analiz edilmiştir. Analiz sonuçlarına göre; 2001 yılında %0,22 olan sertifikasyon oranı, 2015 yılında %35,5'e yükselmiştir. Buna karşılık, fiyat dalgalanmaları ve müşteri kayıp oranı vb. diğer parametrelerde herhangi bir iyileşme görülmemiştir. Çalışmada; sertifika vermeye yetkili kuruluşun kamu otoritesine bağlı olmasının sertifikaların verimliliğini artıracığı belirtilmiştir. YES düzenlemelerinde uluslararası standart benimsenimin piyasa hacimlerini büyüteceği, şeffaf piyasa koşullarının sağlanması halinde YES pazarına olan güveninin artacağı ifade edilmiştir [9].

SHURA tarafından gerçekleştirilen çalışmada [18] YEK-G sistemi değerlendirilmiş ve gönüllü yenilenebilir enerji sertifika sisteminin oluşturulmasının Türkiye'deki yenilenebilir enerji piyasalarının gelişmesine ve uluslararası düzeyde emisyonların azaltılmasına katkı sağlayacağı belirtilmiştir. Bu doğrultuda uluslararası geçerliliği olan bir YES sistemin uygulanmasının

kurumsal tüketiciler ile yenilenebilir enerji üretim ve tedarik şirketleri açısından sürdürülebilirlik taahhütlerini sağlamada katkı sağlayacağı belirtilmiştir.

Çalkoğlu tarafından gerçekleştirilen çalışmada [19], Türkiye'deki YEK yatırımcılarına ek gelir sağlaması için YES sisteminin kurulması gerektiği belirtilmiştir. Çalışmada; YES piyasa hacminin artması için Yenilenebilir Enerji Destekleme Mekanizması (YEKDEM) kapsamındaki santrallerin YES sistemine katılması önerilmiştir. YES'lerin uluslararası olarak satışının yapılması için elektrikten bağımsız olarak satılması ve kamuoyuyla paylaşılan bir portal kurulması gerektiği vurgulanmıştır. Çalışmada, Türkiye'nin Avrupa'da uygulanmakta olan GO sertifika sistemine dâhil olması gerektiği ifade edilmiştir.

3. Yenilenebilir enerji sertifikaları

YES, yenilenebilir enerji hedeflerini karşılamak amacıyla 1 MWh'lık elektrik enerjisinin YEK kullanılarak üretildiğini doğrulayarak etiketleyen, enerji üretiminde daha düşük CO₂ emisyonlarının raporlanmasını sağlayarak %100 yenilenebilir enerji hedeflerine katkıda bulunan sertifikalardır. Sertifikalar Yenilenebilir Enerji Tedarik Anlaşmaları (YETA) ve yeşil tarifeler gibi yenilenebilir enerji tedarik mekanizmalarını desteklemektedirler. RE100 ve Sera Gazı Protokolü gibi standartlarla desteklenen YES'ler, yenilenebilir projeyi piyasa temelli bir yaklaşımla sunarlar. YES'lerin satışı tedarik edilen elektrikle birlikte veya elektrikten bağımsız olarak gerçekleştirilirken, her iki yöntemde de YEK kullanılarak üretilen elektrik enerjisinin menşei izlenebilmektedir [20]. YES'ler; yenilenebilir enerji talepleri ve gereksinimleri doğrultusunda ülkeler tarafından gönüllü ve zorunlu sistemler olarak uygulanabilmektedir [21]. YES sistemleri ve kapsadığı ülkeler Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. YES sistemleri ve kapsadığı ülkeler [22, 23, 24, 25, 26, 27].

YES Standardı	Kapsadığı Ülkeler
Gönüllü Standartlar	
Guarantees of Origin (GOs) – Menşe Garantileri	AB Ülkeleri
Renewable Energy Certificates (RECs) – Yenilenebilir Enerji Sertifikaları	ABD ve Kanada
International Renewable Energy Certificates (I-RECs) – Uluslararası Yenilenebilir Enerji Sertifikaları	Uluslararası
Ulusal Standartlar(T-REC, C-GEC, YEK-G)	T-REC: Tayvan, C-GEC: Çin, YEK-G: Türkiye
Zorunlu Standartlar	
Renewable Portfolio Standards (RPS) - Yenilenebilir Portföy Standartları	ABD ve Birleşik Krallık Meksika, Çin, Kore, Avustralya ve Filipinler
Renewable Obligation Certificates (ROC) - Yenilenebilir Enerji Yükümlülük Sertifikaları	Birleşik Krallık hükümeti
Renewable Energy Guarantees of Origin (REGOs) – Yenilenebilir Enerji Menşe Garantileri	Ofgem (Elektrik ve Gaz Piyasaları Ofisi)

3.1. Gönüllü standartlar

Gönüllü standartlar yasal mevzuat ile uygulanması zorunlu kılınmayan, gönüllülük esaslı standartlardır. Bu standartlar; Menşe Garantileri (GOs), Yenilenebilir Enerji Sertifikaları (RECs), Uluslararası Yenilenebilir Enerji Sertifikaları gibi uluslararası standartlarla veya ülkelerin ulusal standartlarıyla yönetilebilen sertifika sistemleridir.

3.1.1. Menşe garantileri

Menşe Garantileri, hükümet politikalarından bağımsız olarak Avrupa'da gönüllü piyasada elektronik belge olarak alınıp satılan, sürdürülebilirliği destekleyen, tüketicilerin talebi doğrultusunda verilen ve kullanılan elektriğin YEK kullanılarak üretildiğini doğrulayan gönüllü sertifikalardır [28]. Sertifika elektriğin menşei dışında elektriğin üretildiği tarihi, üretim tesisinin kimliğini, yerini, türünü ve kapasitesini, kurulumda dış destekten yararlanıp yararlanılmadığı veya ne

ölçüde yararlanıldığı, kurulunun faaliyete geçtiği tarih gibi nitelikleri belgelemektedir [21,29]. Sertifika pazarı rüzgâr, güneş, hidroelektrik, biyokütle ve jeotermal gibi YEK'lerin yanı sıra fosil kaynakları da içermektedir [30]. Her bir GO, YEK kullanılarak üretilerek şebekeye verilen 1 MWh'lik elektrik enerjisine karşılık gelmektedir [31]. Sertifikanın fiyatı, tüketicilerin yeşil enerjiye talebine ve ülkede bulunan yenilenebilir enerji santrallerinin sayısına bağlı olarak değişmektedir. 2017 yılında Belçika'da güneş enerjisi kaynaklı bir GO ortalama 58,28 Euro-cent/MWh iken, Hollanda'da aynı nitelikteki GO'nun fiyatı 280 Euro-cent/MWh olmuştur. 2013-2016 yılları arasında 203,70 TWh'lik hacmin 136,11 TWh'ı sertifika olarak yayımlanmıştır [9].

Menşe Garantisi pazarlarında üye devletler sertifika tasarımlarında kendi politikalarına bağlı olarak kalite güvencesi ve piyasa organizasyonu konularında değişkenlik yapabilmektedirler. Ülkelerin bir kısmı Avrupa Enerji Sertifika Sistemi (EECS) standardını benimseyerek sertifika ticaretini Düzenleyen Kuruluşlar Birliği (AIB) tarafından yönetilen bir elektronik merkez aracılığıyla yapmaktadırlar. Standarda göre; ülkeler Menşe Garantisi sertifikalarının ithalatını kabul etmekle yükümlüdür fakat iki ülke arasında ihracat kısıtlaması da uygulayabilmekte ve devlet desteği alan üreticilerin sertifika alması kısıtlanabilmektedir. Ülkelerin tasarım özellikleri Tablo 2'de verilmiştir [9].

Tablo 2. Avrupa ülkelerinde uygulanan Menşe Garantisi sertifika programlarının tasarım özellikleri [9].

Ülkeler	Uygulanma Zamanı	Onay Veren Kuruluş	İhracat Kısıtlaması	Sertifika Kısıtlaması
Avusturya	2004	Kamu	Evet	Hayır
Belçika	2006	Kamu	Hayır	Hayır
Kıbrıs	2014	Kamu	Hayır	Hayır
Hırvatistan	2014	Kamu	Hayır	Evet
Çek Cum.	2013	Özel	Hayır	Hayır
Danimarka	2004	Kamu	Hayır	Hayır
Estonya	2010	Kamu	Hayır	Hayır
Finlandiya	2001	Kamu	Hayır	Hayır
Fransa	2013	Özel	Hayır	Evet
Almanya	2013	Kamu	Hayır	Evet
İzlanda	2011	Kamu	Hayır	Hayır
İrlanda	2015	Kamu	Hayır	Evet
İtalya	2013	Kamu	Hayır	Hayır
Lüksemburg	2009	Kamu	Hayır	Evet
Hollanda	2004	Kamu	Hayır	Hayır
Norveç	2006	Kamu	Hayır	Hayır
İspanya	2016	Kamu	Evet	Hayır
İsveç	2006	Kamu	Hayır	Hayır
İsviçre	2009	Kamu	Hayır	Hayır

Türkiye'nin AB üyesi ülkeler tarafından uygulanan GO standardını kullanabilmesi için AIB üyesi olması gereklidir. Türkiye'de 2020 yılında yayımlanan ve beşinci bölümde detaylı olarak incelenen YEK-G yönetmeliği, GO sistemine uyum sağlamak amacıyla, GO standartlarına benzer bir sistem olarak kurgulanmıştır. İlerleyen yıllarda GO sistemi ile entegrasyon sağlanması beklenmektedir [32].

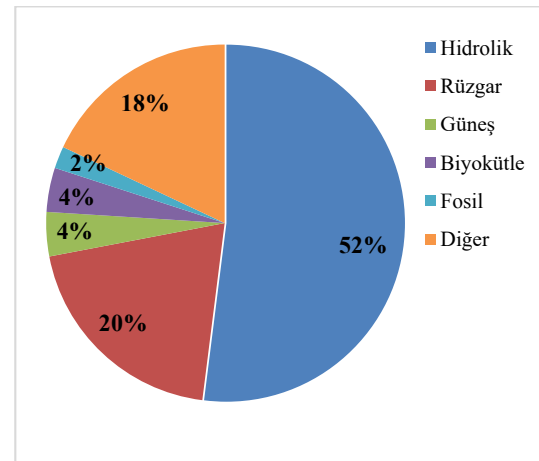
AIB tarafından 2018-2020 yılları arasında düzenlenen GO sertifikalarına ait veriler Tablo 3'de verilmiştir.

Tablo 3. GO'ların TWh cinsinden istatistiksel verileri [33]

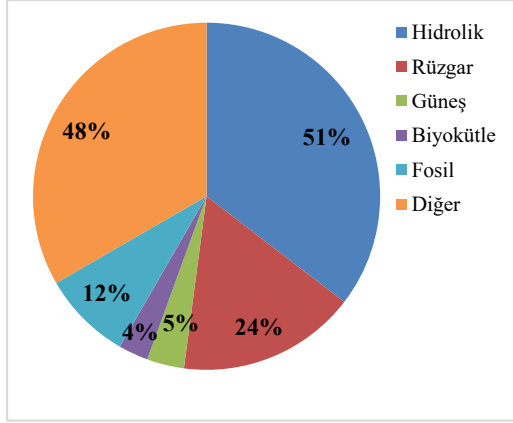
	İhraç Edilen	Transfer	İtfa Edilen	Süresi Dolan
2018	617,2	549,5	523,7	50,5
2019	649,8	859,6	680,6	34,1
2020	761,8	917,7	735,1	26,1
Toplam	2.028,8	2.326,8	1.939,4	110,7

Tablo 3 deki verilere göre; 2020 yılında ihraç edilen GO miktarı 761,8 TWh'dir. 2020 yılında itfa edilen GO miktarı 735,1 TWh'de kalmış, piyasada ihraç fazlası oluşmuştur. 2019 rakamları ile karşılaştırıldığında, 2020 yılında piyasadaki GO tedariki %17'nin üzerinde artarken, sertifikalara olan talebin %8 arttığı görülmüştür [33].

2020 yılında ihraç edilen GO sertifikalarının kaynaklara göre oranları Şekil 5'te, itfa edilen GO sertifikalarının kaynaklara göre oranları ise Şekil 6'da gösterilmiştir [34].



Şekil 5. İhraç edilen GO sertifikalarının kaynaklara göre oranları [34].



Şekil 6. İtfa edilen GO sertifikalarının kaynaklara göre oranları [34].

3.1.2. Yenilenebilir enerji sertifikaları

ABD ve Kanada'da uygulanan yenilenebilir enerji sertifikaları (RECs), elektrik tedarikinin YEK'lerden temin edildiğini ispatlamak için kullanılan, 1 REC'in 1 MWh'lik YEK ile üretilen elektrige karşılık geldiği sertifikalardır [22]. REC, YEK kullanılarak üretilen elektrik enerjisinin kullanılan tüketicinin sera gazı emisyonlarını dolaylı yoldan azalttığını raporlayabilmesi ve YEK'lerin desteklemesi için kullanılabilen uygun bir araçtır. REC'ler arz edilen yenilenebilir enerji ile birlikte veya bağımsız olarak satılabilirler. Sertifikaların

Avrupa dışındaki ülkelerde ticareti yapılabilmektedir [20,35]. REC'ler rüzgâr, güneş, hidroelektrik, biyokütle ve jeotermal gibi YEK'lerden üretilenlerdir [36]. Sertifika verileri; sertifikanın türünü, takip sisteminin kimliğini, YEK'in türünü, üretim tesisinin yerini, projenin kapasitesini, adını ve inşa tarihi, sertifikaya özel kimlik numarası ile YEK'in emisyon oranı gibi nitelikleri içermektedir [37].

YES'ler satış yöntemine göre; YETA veya Yeşil Tarife yoluyla satın alınan paketlenmiş YES ve elektrik tedariki olmadan satın alınan paketlenmemiş YES olmak üzere ikiye ayrılmaktadır [30, 38]. Paketlenmemiş YES'lerin ulusal olarak satın alınması daha kolaydır ve mevcut elektrik tedarik uygulamaları ile uyum sağlamaktadır. Kısa vadeli bir sözleşme ile satın alındığından daha düşük maliyetlidir. Paketlenmiş YES'ler ise, yeni bir projenin geliştirilmesi için gerekli mali desteği sağlayan, satın alınması daha zor olan ve uzun vadeli bir sözleşme ile satın alındığından daha yüksek maliyetlere sahip olan sertifikalardır. Paketlenmiş YES kullanılan YETA'lar enerji üreticisi ile tüketicisi arasındaki elektrik satış için yapılan, süreleri 10 yıl veya daha fazla olan, klasik elektrik satım sözleşmelerinden farklı olarak satın alınan elektriğin yeşil olduğunu kanıtlamak için kullanılacak kaynak belgelerinin neler olacağını belirleyen hükümler içeren sözleşmelerdir [39]. YETA'lar, yenilenebilir enerjinin üretimini teşvik etmek için devletlerin sağladığı desteklerin azalmasından dolayı üreticilerin yatırımlarını finanse etmek amacıyla başvurdukları, tarafların ihtiyaçlarına göre yapılandırılan mekanizmalardır [40,41]. YETA'lar ve YES'lerin birbirleriyle olan ilişkileri Tablo 4'de detaylı olarak açıklanmıştır[42].

Tablo 4. YETA – YES ilişkisi [42].

	YES	YETA
Gerekli Sermaye Harcamaları	Hayır	Hayır, ancak önemli mali taahhüt
İşletme ve Bakım Sorumluluğu	Sorumlu değil	Sorumlu değil
Pazar Bulunabilirliği	Dikey olarak entegre ve serbestleştirilmiş pazarlar	Serbestleştirilmiş pazarlar
Alıcı için Önemi	Küçük şirketlerin ve birden çok yargı alanında küçük yükleri olan büyük şirketlerin yenilenebilir enerji satın almasını sağlar.	Alıcı yalnızca üretilen kilovat-saat için ödeme yapar; sabit veya bilinen bir elektrik oranı sağlayabilir; hem enerji hem de yenilenebilir enerji özelliklerini içerir.
Politika Tasarım Değerlendirmeleri / En İyi Uygulamalar	Enerji özelliklerinin net ve şeffaf takibi	Toptan satış fiyatlarını izleyen perakende fiyatları; üçüncü tarafla PPA imzalama yeteneği; yenilenebilir enerji arzını genişleten politikalar
En iyi uygulama örnekleri	Menşe Garantileri (Avrupa), Yenilenebilir Enerji Sertifikaları (Hindistan, Amerika Birleşik Devletleri)	Brezilya, Meksika, Hollanda, İsveç, Birleşik Krallık, Amerika Birleşik Devletleri
Proje Boyutu	Ölçeklenebilir	Ölçeklenebilir; yerinde ölçek, siteye bağlıdır.

3.1.3. Uluslararası yenilenebilir enerji sertifikaları

I-REC, YEK kullanılarak üretilen elektrik enerjisinin tüketimini belgelemek için kullanılan sertifika olup, sera gazı protokolü tarafından kabul edildiğinden işletmelerin dünya çapında yenilenebilir enerji taahhütlerini karşılamasına olanak sağlamaktadır. Bir I-REC, 1 MWh'lik yenilenebilir enerji kullanılarak üretilen elektrik enerjisine karşılık gelir. I-REC standardı; tüketiciler, elektrik tedarikçileri, elektrik üreticileri ve ulusal hükümetler arasındaki ticareti kolaylaştırmaktadır [29]. I-REC'ler yenilenebilir enerjiyi içeren küresel bir sürdürülebilirlik stratejisi için önemli bir sertifikasyondur [43].

I-REC'lerin düzenlenmesi, santral kaydı ve santralin elektrik üretim ispatının kontrolünün yapıldığı ihraç süreçleri ve ticaret hesabı ile itfa bilgilerinin belirtildiği itfa süreçlerinden oluşmaktadır. Santral kaydında santralin sahibi olan tüzel kişi, santralin teknik özellikleri, üretim lisansı, geçici kabul belgesi, tek-hat şeması, fotoğrafları ve sayaç bilgilerini gösteren belgeler kontrol edilirken, santralin elektrik üretim ispatının kontrolünde ise santrallerin kesinleşmiş elektrik üretim verileri ve ispatları kontrol edilmektedir. İtfa sürecinde ticaret hesabı oluşturulmakta ve sertifika itfa edilirken, tüketicinin tam tüzel ismi, hangi dönem için sertifikanın alındığı ve miktarı karşılıklı kontrol edilerek girilmektedir[44].

I-REC düzenlemeye yetkili kuruluşlar ve yetkili oldukları ülkeler Tablo 5'te verilmiştir [45].

Tablo 5. Ülkelere göre I-REC sertifikası sağlayan kuruluşlar [45].

Kuruluş	Sertifika düzenlenen ülkeler
Dubai Carbon Centre of Excellence (DCCE)	Birleşik Arap Emirlikleri, Ürdün, Fas, Umman, Suudi Arabistan.
ECSIM (the Center for Studies in Systemic Economics)	Kolombiya
Electricity Generating Authority of Thailand (EGAT)	Tayland
Energy Peace Partners (EPP)	Kongo Demokratik Cumhuriyeti
Goal Number Seven (GNS)	Rusya
Green Certificate Company (GCC)	Çin, Kosta Rika, Mısır, El Salvador, Guatemala, Honduras, Hindistan, Endonezya, Nijerya, Malezya, Meksika, Panama, Peru, Filipinler, Sri Lanka, Güney Afrika, Tayvan, Türkiye, Uganda, Vietnam
Green Energy Services (GES)	İsrail
Instituto Totum	Brezilya
Santiago Climate Exchange (SCX)	Şili
Singapore Power (SPX)	Singapur
2021 öncesi-The Green Certificate Company (GCC)	Türkiye
2021 itibariyle-FOTON	

I-REC, YES pazar gelişimi için öncü olarak tanınmakta ve sera gazı protokolü, CDP ve RE100 tarafından yenilenebilir enerji kullanımını belgeleyen bir sertifika olarak tanınmaktadır. I-REC sertifikaları; CDP ve sera gazı protokolü gibi sera gazı raporlama standartlarında yer alan Kapsam 2 emisyonlarını azaltma amaçlı kullanılabilir [19].

Dünya genelinde I-REC'e kayıtlı toplam santral sayısı 535 olup, bu santrallerin toplam kurulu güç değeri 27.397,004 MW'dır. Toplam santrallerin 147'si hidroelektrik, 156'sı FV güneş, 23'ü jeotermal ve 209'u rüzgar enerjisi santralidir. I-REC'e kayıtlı santrallerden 2019 yılında 19.944,932 MWh'lik sertifika yayınlanmıştır [46].

3.1.4. Ulusal yenilenebilir enerji sertifikaları

Ülkeler, kendi belirledikleri ulusal standartlara göre YES kullanabilmektedir. YES'lerin temel amacını benimseyen fakat tasarım olarak farklılıklar içeren ulusal sertifikalardan biri Tayvan'da kullanılan T-REC sertifikasıdır. 1 adet T-REC diğer tüm sertifikalar gibi 1 MWh'lik YEK kullanılarak üretilen elektrik enerjisini ifade etmektedir. Paketlenmiş sertifika olan T-REC platformuna, karbon dengeleme programı katılımcıları dâhil olamamaktadır [23].

Bir diğer ulusal sertifika ise Çin yeşil enerji sertifikası (C-GEC)'dir. C-GEC, Çin Yenilenebilir Enerji Mühendisliği Enstitüsü (CREEI) tarafından tasarlanmış olup, şebekeye bağlı Rüzgâr ve FV güneş projeleri için kullanılmaktadır. 1 adet C-GEC, 1 MWh'lik YEK kullanılarak üretilen elektrik enerjisine karşılık gelmektedir. C-GEC, RPS hedeflerine ulaşmak için kullanabilmektedir [24]. Türkiye'de 1 Haziran 2021 tarihinden itibaren ulusal YES sistemi dâhilinde YEK-G Belgesi düzenlenmeye başlanacaktır [47].

3.2. Zorunlu standartlar

Zorunlu standartlar kapsamında RPS, ROC ve REGOs standartları mevcuttur.

3.2.1. Yenilenebilir portföy standartları

RPS, elektrik tedarikçilerinin tedarik ettikleri elektrik enerjisinin bir bölümünü YEK kullanarak sağlamalarını zorunlu kılan bir mekanizmadır [23]. Bu mekanizmada kullanılacak yenilenebilir enerji teknolojisine piyasa tarafından karar verilmektedir [26]. Çoğunlukla ABD ve Birleşik Krallık'da kullanılan RPS sistemi, Meksika, Çin, Kore, Avustralya ve Filipinler'de de kendi yönetmeliklerine uyarlanmış şekilde kullanılmaktadır [25]. RPS enerji dağıtım şirketlerinin YES piyasasına yönelmesini sağlamaktadır. Kore'de yapılan bir çalışmaya göre; her yıl artan RPS oranı, enerji üreticilerinin YES piyasasına yaptıkları yatırımlarda artışa neden olmuştur [48].

3.2.2. Yenilenebilir enerji yükümlülük sertifikaları

ROC; Birleşik Krallık tarafından yürütülen, elektrik tedarikçilerinin YEK kullanılarak üretilen elektriği tedarik etmesini gerektiren, artan kota tabanlı bir sistemdir. Tedarikçilerin yükümlülüklerinin yerine getirildiğini kanıtlamak için sağladıkları her 1 MWh elektrik için ROC oluşturmaları gerekmektedir. Belirlenen miktarda ROC üretmemeleri halinde, tedarikçilerin bir satın alma ücreti ödemeleri gerekmektedir [27].

3.2.3. Yenilenebilir enerji menşé garantileri

REGO'lar; Birleşik Krallık'da uygulanan fakat Avrupa çapında ticareti yapılabilen, yenilenebilir enerji kaynağı kullanılarak üretilen 1 MWh elektrik enerjisi için 1 adet olacak şekilde düzenlenen sertifikalardır. Bir santralin sadece YEK kullanarak elektrik üretmesi durumunda brüt üretim için düzenlenmektedir. REGO'lar sadece akredite olmuş bir üretim santrali için talep edilebilmektedir [26]. Bu mekanizma, Birleşik Krallık'da 2003 yılında 1 REGO/kWh elektrik olacak şekilde benimsenmiş ancak 2010 yılından itibaren 1 REGO/MWh olarak değiştirilmiştir [49].

3.3. Eko etiketler

Eko Etiketler, 1992 yılından itibaren Avrupa'da başlayan ve Dünya çapında tanınan, ürün veya hizmetin yaşam döngüsü boyunca yüksek çevre standartlarını karşıladığı göstererek öz niteliklerini içeren gönüllük temelli kalite etiketleridir. Etiket ürünün hammadde çıkarımından başlayarak üretim, dağıtım ve son aşaması olan bertarafına kadar tüm süreçlerini değerlendirmektedir. Eko etiketler üreticileri üretim aşamasında atıkları ve CO₂ emisyonlarını azaltmaya, dayanıklı, onarılabilir ve geri dönüştürülebilir ürünler tasarlamaya teşvik ederek döngüsel ekonomiyi desteklemektedirler [50]. Elektrik üreticileri farklı kuruluşlar tarafından verilen eko etiketlerden satın alarak ürününün tüm süreçlerinde daha çevreci olduğu kanıtlama imkânı bulabilmektedir. YES'ler ile birlikte kullanılabilen etiketler YES'lerin amacını çok daha iyi karşılayabilmektedir.

Eko etikete sahip ürünler sürekli iyileştirmeyi amaçlayan, çevresel ve sosyal sürdürülebilirlik olarak en iyi seviyede olan tasarımlara sahip olarak değerlendirilmektedir. Türkiye'de pek yaygın olarak kullanılmayan eko etiketler, genellikle müşteri talepleri doğrultusunda santrale yönelik alınmaktadır. YES veren tesislerin yeşil etikete sahip olmaları zorunlu değildir

[51,52,53,54]. Farklı ülkelerde uygulanan eko etiketleri ve kapsamları Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 6. Eko Etiketler [55].

ETİKET	KAPSAMI
EKOENERGY	Menşe Garantileri, REC ve I-REC sertifikalarına spesifik özellikler getirerek satın alınan elektriği desteklerken, gelişmekte olan ülkelerdeki yenilenebilir enerji projelerine fon sağlamaktadır.
OK POWER	Menşe Garantileri ile belgelenmiş yenilenebilir enerjiyi kapsayan OK Power, yeni enerji santrallerinde üretilen enerjiyi teşvik eden bir Alman eko etiketidir.
TÜV SÜD – EE01	Menşe Garantilerinin satın alınması ve yenilenebilir enerjinin eko etiket kriterlerini sağlayan, yeni enerji santrallerinin fonlarını desteklemek için çeşitli teknolojilerin kullanımını teşvik eden bir Alman eko etiketidir.
GREEN-E® ENERGY	%100 yenilenebilir enerji iddiasıyla Kapsam 2 emisyonlarını hedef almak isteyen şirketler tarafından satın alınabilen, Kuzey Amerika'nın önde gelen etiketidir.
BRA MİLJÖVAL	Menşe garantilerinin satın alınmasını içeren İsveç eko etiketi, yenilenebilir elektrik santralindeki üretimin çevresindeki flora ve faunaya verdiği çevresel etkileri hesaba katan, enerji santrali operasyonlarının çevreyi korumasına dair kriterlere sahip bir eko etikettir.
TÜV NORD A75	Yeni enerji santrallerinden gelen enerjiyi destekleyen bir Alman eko etiketi olup TÜV Nord tarafından yönetilmektedir. Bu eko etiketle Menşe Garantilerinin Satın Alınması, yenilenebilir enerjinin eko etiket kriterlerini sağlamaktadır.
NATUREMADE STAR	Ekolojik iyileştirme taahhüdü ile çevresel ve ekolojik olarak üretilen enerji için İsviçre'de kullanılan eko etiket, Menşe Garantilerinin satın alınması, yenilenebilir enerjinin eko etiket kriterlerine uymasını garanti etmektedir.

4. Türkiye'de kullanılan yenilenebilir enerji sertifika sistemleri

Türkiye'de ilk YES uygulaması 2015 yılı itibarıyla kullanılmaya başlanan I-REC sertifikaları ile gerçekleştirilmiştir. Uluslararası olan bu sistemin yanında; 1 Haziran 2021 tarihinden itibaren ulusal YES sistemi olarak YEK-G uygulanacaktır.

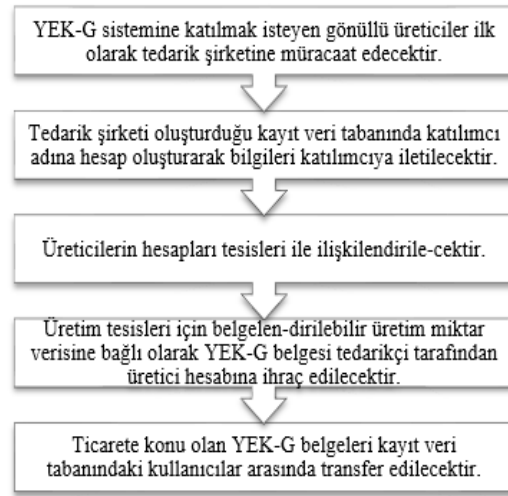
4.1. Türkiye ulusal yenilenebilir enerji sertifika sisteminin hukuki boyutu

YEK-G yönetmeliği 14 Kasım 2020 tarihinde yayınlanmıştır. Yönetmelik, lisanssız üreticileri kapsam dışında değerlendirerek, tüketicilere tedarik edilen elektriğin lisanslı üreticiler tarafından YEK kullanılarak üretildiğini şeffaf bir şekilde takip, ispat ve ifşa etmeyi düzenlemektedir. YEK-G sisteminde piyasa işletmecisi Enerji Piyasaları İşletme A.Ş. (EPİAŞ), YEK-G sistemini ve kayıt veri tabanını kurmak, işletmek ve yönetmekle yükümlü olup tüketicilere 1 MWh

üretim miktarı için 1 adet YEK-G olacak şekilde sertifikaları ihraç edecek kuruluş olacaktır. Sertifika elektrik üretim dönemi bitiş tarihinden itibaren 12 ay geçerli olacak ve Türkçe ve İngilizce olarak temin edilebilecektir. Enerjinin niteliğine bağlı olarak bilgi vermeyi amaçlayan farklı bir sisteme kayıtlı santral aynı takvim yılı içerisinde, çifte sayımı engellemek adına YEK-G sistemine kayıt işlemini gerçekleştiremeyecektir. Görevli tedarik şirketleri yeşil tarifeyi tercih eden tüketicilere, tedarik ettikleri elektriğin YEK kullanılarak üretildiğini YEK-G belgesi ile kanıtlayabilmekte, bu kanıtı elektrik faturalarına özel bir işaret koyarak ifşa edebilmektedirler [47].

3 Şubat 2021 tarihinde taslak olarak görüşe açılan "YEK-G Sistemi ve Organize YEK-G Piyasası İşletim Usul ve Esasları"; Elektrik Piyasasında YEK-G belgesi yönetmeliğinde belirtilen ve usul ve esaslarda bulunması gereken hususları düzenlemektedir [56].

YEK-G sistemine katılım, görevli tedarik şirketine yapılan başvuru ile başlar. YEK-G sisteminin işleyişi Şekil 7'de özetlenmektedir.

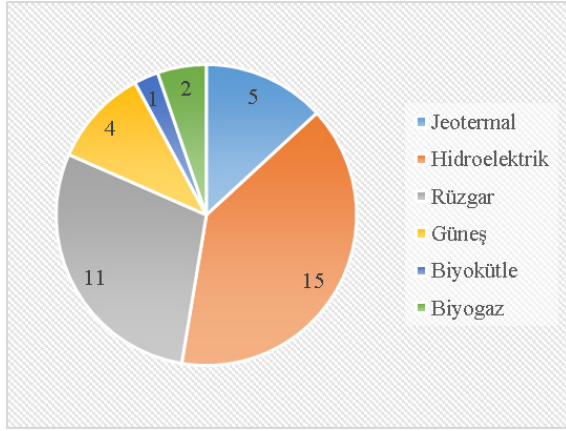


Şekil 7. YEK-G sisteminin işleyişi [47]

YEK-G yönetmeliğinde açık olarak belirtilmemekle birlikte; YEKDEM'den yararlanan santraller de sertifika ihraç edebilecek, YEK-G ve I-REC sistemleri faaliyetlerini bağımsız olarak sürdürecektir. YEK-G kapsamı dışında olan lisanssız üreticilerin de ilerleyen dönemlerde YEK-G sistemine dâhil olması planlanmaktadır [32].

4.2. Türkiye'nin YES potansiyeli ve değerlendirme oranı

Türkiye'de I-REC sistemine kayıtlı toplam 1.540,128 MW kurulu güce sahip 38 santral bulunmaktadır. Bu santrallerin 15'i hidroelektrik, 11'i rüzgâr, 5'i jeotermal, 4'ü FV güneş, 2'si biyogaz ve 1 tanesi biyokütle santralidir (Şekil 8). Türkiye'de I-REC'e kayıtlı yenilenebilir enerji santrallerin kaynak türlerine göre kurulu gücü Tablo 7'de gösterilmiştir [57].



Şekil 8. Türkiye'de I-REC'e kayıtlı santraller

Tablo 7. Türkiye'de I-REC'e kayıtlı yenilenebilir enerji santrallerin kurulu gücü

Kaynak Türleri	Kurulu Güç (MW)
Jeotermal	129,500
Hidroelektrik	979,820
Rüzgâr	369,300
Güneş	44,600
Biyokütle	12,000
Biyogaz	4,908
Toplam	1.540,128

T.C. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK)'nın 2015-2020 yılları arasındaki elektrik tüketim verileri bazında yapılan analiz sonucunda, ülkemizdeki YES'lerin yıllara göre değişen potansiyel değerleri Tablo 8'de verilmiştir. Analiz kapsamında yıllık tüketilen elektriğinin, faturalanan miktarları üzerinden ihraç edilebilecek kapasite hesabı yapılmıştır [58,59,60,61,62,63].

Tablo 8. Yıllık elektrik tüketime bağlı sertifika potansiyeli [58,59,60,61,62,63]

Yıllar	Toplam faturalanan elektrik tüketimi (MWh)	Elektrik üretiminde yenilenebilir kaynak oranı	Toplam faturalanan yenilenebilir kaynaklı elektrik tüketimi (MWh)	Sertifika potansiyeli (MWh)
2015	193.427.144,60	32,13	62.144.660,30	43.811.985,51
2016	212.328.766,43	33,24	70.575.338,91	50.108.490,63
2017	225.713.528,13	29,53	66.653.620,64	47.630.677,31
2018	233.610.029,54	32,31	75.482.991,37	53.404.216,39
2019	229.597.913,65	43,97	100.957.933,48	70.185.955,35
2020(10 ay)	192.881.116,00	31,15	60.085.894,75	41.933.945,95

Lisanssız ve lisanslı santrallerden üretilen elektrik enerjisinin şebekedeki tüketim miktarları ayrı ayrı hesaplanmadığından, analiz toplam tüketim miktarları

üzerinden yapılmıştır. Ayrıca Tablo 9'da yıllara göre lisanssız santrallerden üretilen enerji miktarları verilmiştir.

Tablo 9. Lisanssız santrallerden üretilen elektrik miktarı [58,59,60,61,62,63]

Yıllar	Toplam lisanssız üretilen elektrik miktarı (MWh)	Üretilen Lisanssız Elektriğin Kaynak oranı (%)			
		Rüzgar	Güneş	Hidrolik	Biyokütle
2015	222.685,01	0,18	83,07	0,09	16,66
2016	1.137.871,75	0,73	90,64	0,54	8,10
2017	3.031.558,05	1,21	93,57	0,64	4,57
2018	8.212.409,37	1,36	95,71	0,42	2,51
2019	9.829.450,00	1,16	95,90	0,34	2,60
2020(10 ay)	10.037.563,00	2,06	93,52	0,36	4,07

Tablo 8'deki verilere göre Türkiye'nin 2019 yılı toplam YES potansiyeli 70.185.955,35 MWh olup, lisanssız üreticilere sertifika sağlama imkânı verildiği durumda lisanssız üreticilerin 9.829.450,00 MWh'lik potansiyeli de kullanılabilir. Tablo 8'de yer alan veriler; sanayi ve ticaret kuruluşların faturalanan elektrik tüketim miktarları ve Türkiye'nin toplam elektrik enerjisi üretimindeki YEK oranı dikkate alınarak hesaplanmıştır.

I-REC verilerine göre Türkiye'nin kayıtlı I-REC hacmi 505,872 MWh'dır [46]. Fakat toplam YES potansiyeli ile oranlandığından toplam kurulu YEK gücünün %0,72'sinden sertifika yayımlandığı hesaplanmıştır. EPDK verileri doğrultusunda Tablo 9'da verilen, lisanssız üreticilerinde yıllık elektrik üretimlerinin yıllara oranla artış gösterdiği ve tüketim

miktarlarının da ciddi bir sertifika potansiyeline sahip olduğu görülmektedir.

4.3. YES kullanan kuruluşlar

Türkiye'de faaliyet gösteren farklı sektörlerde faaliyet yürüten uluslararası kuruluşlar, elektrik enerjisi kaynaklı dolaylı emisyonlarını dengelemek amacıyla YES kullanmaktadır. Bu durum YEK üreticilerinin ek gelir elde etmelerine imkân sunmaktadır [64]. Türkiye'de bulunan ve farklı sektörlerde faaliyet yürüten uluslararası birçok kuruluşun son yıllarda I-REC sertifikası kullanmaktadır [65,66,67].

5. Sonuç ve tartışma

Elektrik enerjisi sektöründe YEK kullanımı, fosil yakıt kullanımı kaynaklı CO₂ emisyonu miktarını azaltarak iklim

değişikliğini önlemede olumlu katkı sağlar. Bu çalışma kapsamında elektrik enerjisi tüketimi kaynaklı emisyonlara değinilerek, bu emisyonların azaltılması için uygulanabilecek piyasa tabanlı araçlardan biri olan YES'ler incelenmiştir. 1 MWh'lik elektrik enerjisinin YEK kullanılarak üretildiğini belgeleyen YES'ler; üreticileri desteklerken, tüketicilerin de elektrik kaynakları hakkında bilgi sahibi olmalarına katkı sağlamaktadır. Çalışma kapsamında; Türkiye'nin faturalı elektrik tüketim miktarı verileri ve yenilenebilir enerji üretim kapasitesi verileri ile Türkiye'nin ihraç edilebilecek toplam YES potansiyeli hesaplanarak piyasa analizi gerçekleştirilmiştir. Aynı amaca hitap eden YES'ler ülkelere göre farklı tasarlanmaktadır. Dünya'nın birçok ülkesinde YES'ler tüm YEK'leri içerse de ABD'de kullanılan Güneş Kaynaklı Yenilenebilir Enerji Sertifikaları (SREC) bu durumu değiştirmektedir. Sadece güneş enerjisinden elektrik üreten üreticileri destekleyen bu sertifika programı güneş enerjisi kapasitesi yüksek olan ülkelerde faydalı olabilecek bir uygulamadır. Fakat güneş enerjisi piyasasında yaşanacak fiyat dalgalanmaları güneş kaynaklı YES alımını azaltarak sektörü olumsuz etkileyebilmektedir [68]. Türkiye'deki sertifikaların fiyatları; YEK kaynaklı üretim yapan kuruluşların sahip olduğu portföy büyüklüğü ve portföyünde yer alan santralin üretim maliyet değerlerine göre değişkenlik göstermektedir. Lisanslı FV güneş enerjisi santrallerinin sayısı diğer kaynaklara oranla daha düşük olduğundan, en yüksek fiyatlı sertifikalar güneş kaynaklı sertifikalardır [69]. Türkiye'de mevcut YES fiyatları 0,25-0,50 Euro arasında değişmektedir [70]. Sertifikaların miktarında santralin belgelediği YES miktarına bağlı olarak da değişkenlik gösterebilmektedir. Örneğin 1000 MW Kurulu güce sahip bir santral için oluşturulan YES'in fiyatı 200.000 MW Kurulu güce sahip santrale oranla daha yüksek olmaktadır [70]. Dünya'da yapılan çalışmalar incelendiğinde; YES piyasasının gelişmesini engelleyen en önemli faktörün sertifika fiyatlarında yaşanan dalgalanma olduğu görülmektedir [9].

Ülkeler YES politikalarını ulusal veya uluslararası olarak yönetebilmektedir. Uluslararası geçerliği olan YES sisteminin uygulanması; YES piyasalarını güçlendirmekte, uluslararası piyasa hacimlerinden ve şeffaflığından faydalanma imkânı sunmaktadır. Uluslararası YES sistemine entegre bir YES kullanımı, şirketlerin sürdürülebilirlik raporlarında sera gazı emisyonlarını raporlama imkanı sunmaktadır [12].

Ülkemizde şunda uluslararası bir YES olan I-REC kullanılırken, 2021 yılı Haziran ayı itibariyle ulusal bir sertifika olan YEK-G belgesi de kullanılacaktır. Bu doğrultuda Türkiye'de de ilerleyen dönemlerde YEK-G sertifika sisteminin uluslararası bir standart olan GO sistemine uyarlanması ile uluslararası düzen çerçevesinde uygulanması planlanmalıdır.

Türkiye'de YES kullanımı genellikle küresel şirketlerin yurtdışındaki karar merkezleri tarafından talebi üzerine gerçekleştirilmektedir. YES piyasası Türkiye'de henüz yeni bir piyasa olup, yeni santrallerin kayıtlarının yapılmasıyla genişlemektedir.

Türkiye'nin YEK kaynaklı elektrik üretim kapasitesi ve elektrik tüketim miktarları incelendiğinde, üretilen elektrik miktarına karşın çok düşük miktarlarda sertifika itfa edildiği görülmektedir. EPDK'nın yıllık elektrik tüketim verileri değerlendirildiğinde ülkemizde YEK kullanılarak üretilen elektrik enerjisi değerinin artış gösterdiği ve YES'ler için günümüzdeki sertifika verilerine göre çok daha fazla potansiyele sahip bulunduğu görülmektedir. 2019 yılında I-REC

tarafından yayınlanan sertifika miktarı ile Türkiye'nin YEK kullanılarak tüketilen 70.185.955,35 MWh'lık elektrik enerjisi miktarı dikkate alındığında; toplam ihraç edilebilir YES potansiyelinin %0,72 oranında değerlendirildiği görülmektedir. 2019 yılında lisanssız santraller tarafından üretilen elektrik enerjisi miktarı 9.829.450,00 MWh'dir. Bu değer lisanssız üreticilerin önemli bir YES ihraç potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir. Buna karşılık lisanssız elektrik üretimi kapsamındaki santraller; hem I-REC sertifika sistemine hem de YEK-G sertifika sisteminin kapsamı dışındadırlar.

6. Öneriler

YEK-G sisteminin uygulanması ile birlikte tüketiciler YEK-G belgelerini kaynak türüne göre tercih edebilecek, böylece piyasada kaynak bazında fiyatlar belirlenmiş olacaktır. Fiyat dalgalanması dezavantajının azaltılması için Türkiye'de uygulanacak YEK-G sisteminin sürekli izlenmesi sonrasında analiz edilmesi ve tarife garantisi gibi mekanizmalar ile desteklenmesi faydalı olacaktır. YEK-G sisteminin I-REC sistemine göre en önemli dezavantajı, sistemin uluslararası olmamasıdır. Gönüllülük esasına dayalı olarak YES ticaret sisteminin uluslararası olarak oluşturulması hem Türkiye'de enerji piyasasının gelişimini hem de uluslararası anlamda emisyon azaltımını önemli ölçüde etkileyecektir. Uluslararası bir standarda bağlı olarak yürütülen YEK-G piyasası; piyasa hacimlerinde artış yaşanmasını sağlayacak, piyasa şeffaflığını artıracak ve bu sisteme bağlı olarak ihracı yapılan YES'lerin şirketler tarafından uluslararası raporlamalarda kullanılmasına olanak sağlayacaktır.

Yenilenebilir teknoloji santrallerin kurulumu ve elektrik üretimi sırasında emisyon başta olmak çeşitli çevresel etkiler gözlemlenebilmektedir. Ancak Türkiye'de düzenlenen YES'lerde enerjinin üretimi sırasında oluşabilecek emisyonlar ile ilgili herhangi bir bilgi verilmemektedir. Eko etiketler bu konuya bir açıklık getirerek elektrik üretiminin tüm aşamalarındaki çevresel etkilerini belgeyerek raporlamanın daha doğru yapılmasına olanak sağlayacaktır.

Türkiye güneş enerjisinden elektrik üretim potansiyeli yüksek bir ülke olduğundan ABD'de uygulanan sisteme benzer bir şekilde sadece güneş enerjisinden elde edilen elektriği belgeleyen bir sertifikasyonun uygulanması güneş enerjisi kaynaklı elektrik üretimini arttıracaktır. Söz konusu üreticilere destek sağlayan bu sertifikasyonda, mevsimsel değişikliklere bağlı olarak sertifika fiyatlarıdaki değişim analiz edilmelidir.

Lisanssız elektrik enerjisi üretim tesislerinin YEK-G mekanizmasına dâhil edilmesi gereklidir. Bu tesislerin YEK-G mekanizmasına dâhil edilmesi; toplam sertifika oranını arttıracak, lisanssız elektrik üreticileri ek gelir sağlayacak ve yenilenebilir enerji sektörü katılımcılarının sayısı artacaktır.

Referanslar

- [1] TUİK, 1990-2018 Sera Gazı Emisyonları (Milyon Ton CO₂ Eşdeğeri) URL: (<https://tuikweb.tuik.gov.tr>) (Erişim Tarihi: 03 Ocak 2021).
- [2] M. Crippa, G. Oreggioni, D. Guizzardi, M. Muntean, E. Schaaf, E. Lo Vullo, E. Vignati, 2019. Fossil CO₂ and GHG emissions of all World countries. Luxembourg: Publication Office of the European Union, ISBN 978-92-76-11100-9, doi:10.2760/687800.

- [3] TUİK, 1990-2018.Sektörlere Göre Toplam Sera Gazı Emisyonları (Milyon Ton CO2 Eşdeğeri) URL: (<https://tuikweb.tuik.gov.tr>) (Erişim Tarihi: 03 Ocak 2021).
- [4] Ekonomik göstergeler merceğinden yeni iklim rejimi, 2020. TUSIAD, ISBN: 978-605-165-047-0 URL: (<https://tusiad.org/tr>) (Erişim Tarihi: 03 Ocak 2021).
- [5] T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi URL: (<https://iklim.csb.gov.tr/birlesmis-milletler-iklim-degisikligi-cerceve-sozlesmesi-i-4362>) (Erişim Tarihi: 15 Ocak 2021).
- [6] T. İçmeli, İklim Değişikliği İle Mücadelede Tarihi Dönem Paris Anlaşması Ve Türkiye, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı İklim Değişikliği Dairesi(Sunum) URL: (https://www.ikv.org.tr/images/files/Tu%C4%B0Fba%20%C4%B0%C3%A7meli_pptx) (Erişim Tarihi: 18 Kasım 2020).
- [7] Niyet Edilen Ulusal Katkı ile Yürütülmesi Öngörülen Plan Politikalar URL: (<https://iklim.csb.gov.tr/paris-anlasmasi-i-98587>) (Erişim tarihi: 15 Ocak 2021).
- [8] T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı, Karbon Piyasalarında Ulusal Deneyim Ve Geleceğe Bakış, Ankara, Ocak 2011(Erişim Tarihi: 15 Ocak 2021).
- [9] D. Hulshof, C. Jepma, M. Mulder, Performance of markets for European renewable energy certificates. Energy Policy 128, 697-710, 2019.
- [10] M.A. Akkaya, M. Onuk, Is Renewable Energy Certification System Necessary for Turkey? (https://www.researchgate.net/publication/344688268_Is_Renewable_Energy_Certification_System_Necessary_for_Turkey) (Erişim Tarihi: 18 Aralık 2020).
- [11] A. Hamburger, Is guarantee of origin really an effective energy policy tool in Europe? A critical approach. Society and Economy 41(4), 487-507, 2019.
- [12] B. Sultanoğlu, Y. Özerhan, İklim Değişikliği Raporlaması: Türkiye'deki İşletmelerin Gönüllü Karbon Saydamlık Projesi (Cdp) Açıklamaları. Muhasebe Bilim Dünyası Dergisi, 22, 176-194, 2020.
- [13] RE100 URL: (<https://www.there100.org/>) (Erişim Tarihi: 26 Kasım 2020).
- [14] B.K. Jo, G. Jang, An Evaluation of the Effect on the Expansion of Photovoltaic Power Generation According to Renewable Energy Certificates on Energy Storage Systems: A Case Study of the Korean Renewable Energy Market. Sustainability 11(16), 4337, 2019.
- [15] Q. Zhang, G. Wang , Y. Li , H. Li , B. McLellan, S. Chen, Substitution effect of renewable portfolio standards and renewable energy certificate trading for feed-in tariff. Applied Energy 227, 426–435 Zhang Q., Wang G., Li Y., Li H., McLellan B, Chen S., 2018. Substitution effect of renewable portfolio standards and renewable energy certificate trading for feed-in tariff. Applied Energy 227, 426–435, 2018.
- [16] J. Chuang, H.L. Lien, W. Den, L. Iskandar, P. H. Liao, The relationship between electricity emission factor and renewable energy certificate: The free rider and outsider effect. Sustainable Environment Research 28(6), 422-429, 2018.
- [17] J. Adamczyk, M. Graczyk, Green certificates as an instrument to support renewable energy in Poland—Strengths and weaknesses. Environmental Science and Pollution Research 27(6), 6577-6588, 2020.
- [18] SHURA, "Türkiye'de Yenilenebilir Enerji Sertifikalandırma ve Ticaret Sistemi Nasıl Olmalıdır?" Webinar Özet Raporu, 27 Temmuz 2020, İstanbul (Erişim Tarihi: 15 Kasım 2020).
- [19] Ü. Çalıkoglu, Türkiye Enerji Piyasasında Yeşil Elektrik Ve Yeşil Sertifika Talebinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Temiz Tükenmez Enerjiler Anabilim Dalı, Ankara, 2017.
- [20] Natural Capital Partners, Energy Attribute Certificates: Help companies achieve renewable energy goals URL: (https://assets.naturalcapitalpartners.com/downloads/Energy_Attribute_Certificate_Factsheet.pdf) (Erişim Tarihi: 28 Kasım 2020).
- [21] Uluslararası REC'ler (I-REC'ler) URL: (<https://www.ecohz.com/renewable-energy-solutions/international-recs-i-recs/>) (Erişim Tarihi: 26 Ekim 2020).
- [22] Menşeye Garantileri URL: (<https://becour.com/guarantees-of-origin>) (Erişim Tarihi: 15 Kasım 2020).
- [23] Green power procurement, Understanding the options, June 2017(Rapor) URL: (<https://www.wsp.com/-/media/Sector/US/Document/pdf-WSP-Whitepaper-Green-Power.pdf>) (Erişim Tarihi: 02 Kasım 2020).
- [24] Meeting demand with supply: renewable energy market briefing Taiwan, December 2020 (Rapor)(RE100, CDP) (Erişim Tarihi:10 Ocak 2021).
- [25] Green Electricity Certificate (GECs) of China, Technical Assessment Report, August 2020(Rapor)(RE100, CDP) (Erişim Tarihi:10 Ocak 2021).
- [26] Yenilenebilir Enerji Menşeye Garantileri (REGO) URL: (<https://www.ofgem.gov.uk/environmental-programmes/rego/about-rego-scheme>) (Erişim Tarihi: 14.11.2020).
- [27] Incentivising renewable electricity – a comparison of Renewable Obligation Certificates and Feed-in tariffs, September 2010. Research Paper Aidan Stennett, Research and Library Service.
- [28] Avrupa Birliği Resmi Gazetesi, Avrupa Parlamentosu Ve Konsey Direktifi (AB) 2018/2001, Article 19

- Guarantees of origin for energy from renewable sources 11 Aralık 2018 (Erişim Tarihi: 15 Ocak 2021).
- [29] Natural Capital Partners, International RECs (I-RECs), Enabling Businesses to Meet Renewable Energy Commitments Throughout the World.
- [30] 21st Century Power Partnership Report, Policies for Enabling Corporate Sourcing of Renewable Energy Internationally, Technical Report, Mayıs 2017 URL: (<https://www.oneplanetnetwork.org/sites/default/files/68149.pdf>) (Erişim Tarihi: 28 Ekim 2020).
- [31] Sustainability Roundtable, Inc. Sustainable Real Estate Roundtable: Member Briefing International Markets For Renewable Energy Certificates (RECs), Page 6, 2012 (Rapor) URL: (http://www.sustainround.com/library/sites/default/files/SR%20Inc_SBER-ELC_Member%20Briefing_International%20Markets%20for%20RECs_2012-07-16.pdf) Erişim Tarihi: 27 Ekim 2020).
- [32] Hakkı ÖZATA, Organize Elektrik Piyasaları Grup Başkanı, EPDK; (Görüşme Tarihi: 05.01.2021).
- [33] GO'ların TWh cinsinden istatistiksel verileri URL: (<https://www.greenfact.com/News/1387/AIB-2020-GO-statistics-summary>) Erişim Tarihi: 12 Şubat 2021).
- [34] Satılan ve iptal edilen GO'ların kaynaklarının yüzdelik gösterimi URL: (<https://www.aib-net.org/facts/market-information/statistics/activity-statistics-all-aib-members>) (Erişim Tarihi: 13 Şubat 2021).
- [35] The International REC Standard, Interaction avoided emission rights and RECs, February 2020 URL: (<https://www.irecstandard.org>) Erişim Tarihi: 18 Kasım 2020).
- [36] Menşe Garantileri URL: (https://www.certify.eu/images/media/files/WG3_20180123_Energy_Certification_Presented_Slides.V.0.pdf) (Erişim Tarihi: 11 Kasım 2020)
- [37] Yenilenebilir Enerji Sertifikaları (REC'ler) URL: (<https://www.epa.gov/greenpower/renewable-energy-certificates-recs>) (Erişim Tarihi: 26 Kasım 2020).
- [38] Zero Code, Off-Site Procurement of Renewable Energy April 2018, Technical Support Document. URL: <https://zero-code.org/wp-content/uploads/2018/04/Zero-Code-TSD-OffSiteRenewables.pdf> (Erişim Tarihi: 28 Kasım 2020).
- [39] M. Özcan, Kurumsal Yenilenebilir Enerji Tedarik Anlaşmaları ve Türkiye Elektrik Piyasasında Uygulanabilirliği, Elektrik Elektronik Mühendisliği Kongresi (EEMKON 2019), İstanbul, Türkiye, 14 - 16 Kasım 2019.
- [40] Green power procurement Understanding the options, June 2017 URL: (<https://www.urbangridsolar.com/what-is-a-rec-how-do-they-work/>) (Erişim Tarihi: 05 Ocak 2020)
- [41] Broom R., Wright P., Davey H., Hanas I., O'Hop P., Mingot M., February 2020. The Preferred Route for Corporates to Secure Renewable Energy Supplies in a Decarbonized World, Corporate Power Purchase Agreements, Squirepatton Boggs URL: (<https://www.squirepattonboggs.com/-/media/files/insights/publications/2020/02/corporate-power-purchase-agreements/enccorporate-power-purchase-agreementspitch.pdf>) (Erişim Tarihi: 28 Kasım 2020)
- [42] Bird, L., Heeter, J., O'Shaughnessy, E., Speer, B., Cook, O., Jones, T., Nilson, E. 2017. Policies for Enabling Corporate Sourcing of Renewable Energy Internationally: A 21st Century Power Partnership Report (No. NREL/TP-6A50-68149). National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States).
- [43] P. Nandagopal and T.S. Devaraja, International Journal of Current Research and Academic Review, International REC Standard for Empowering Renewable Power Generation, ISSN: 2347-3215 (Online), Volume 6, Number 5, (May-2018).
- [44] Can ARSLAN, Foton Enerji (Veri alış tarihi: 08.12.2020) .
- [45] I-REC Issuers under the Electricity Code, 2020. International REC Standard Foundation secretariat.
- [46] Türkiye I-REC Verileri URL: (<https://www.irecstandard.org/wp-content/uploads/2020/08/StatsReport-2020-05-EE.pdf>) (Erişim Tarihi: 02 Şubat 2021).
- [47] EPDK R.G. Tarih-No: 14.11.2020-31304, Elektrik Piyasasında Yenilenebilir Enerji Kaynak Garanti Belgesi Yönetmeliği, Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu, Ankara, Türkiye, 2020. URL: (<https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2020/11/20201114-2.htm>).
- [48] B. K. Jo, G. Jang, An Evaluation of the Effect on the Expansion of Photovoltaic Power Generation According to Renewable Energy Certificates on Energy Storage Systems: A Case Study of the Korean Renewable Energy Market. Sustainability 11(16), 4337, 2019.
- [49] A. Vantoch-Wood, J. Groot, P. Connor, I. Bailey, I. Whitehead, V. Hamlyn, J. Xu, National Policy Framework For Marine Renewable Energy Within The United Kingdom. MERiFIC Task, 4(1), 2012.
- [50] Eko Etiketler URL: (<https://ec.europa.eu/environment/ecolabel/>)(Erişim Tarihi: 07 Ocak 2020) Türkiye, 2020.
- [51] A.C. Gündoğan, E. Turhan, C.İ. Aydın, M.Ö. Berke, 2017. 100 Maddede Sürdürülebilirlik Rehberi, İş Dünyası ve Sürdürülebilir Kalkınma Derneği, İstanbul,

- Türkiye. URL: (<http://www.skdturkiye.org/files/yayin/100-maddede-surdurulebilirlik-rehberi.pdf>) (Erişim Tarihi: 25 Aralık 2020).
- [52] Yalçın Altuntaş, Borusan ENBW, (Görüşme Tarihi: 19.01.2021).
- [53] Seda Sener, EnerjiSA (Görüşme Tarihi: 19.01.2021).
- [54] I-REC Issuers under the Electricity Code, 2020. International REC Standard Foundation secretariat. URL: (<https://www.irecstandard.org/registrants/>) (Erişim Tarihi: 20 Ocak 2021).
- [55] Eko Etiketler URL: (<https://www.ecohz.com/renewable-energy-solutions/labels-and-standards/>) (Erişim Tarihi: 07 Ocak 2020).
- [56] EPDK, YEK-G Sistemi ve Organize Yek-G Piyasası İşletim Usul ve Esasları (Taslak) URL: (<https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/4-9332/yek-g-sistemi-ve-organize-yek-g-piyasasi-isletim->) (Erişim Tarihi: 4 Şubat 2021).
- [57] IREC Cihaz Kaydı Raporu URL: (<https://v-1.evident.app/Public/ReportDevices/>) (Erişim Tarihi: 03 Şubat 2021).
- [58] Elektrik Piyasası 2015 Yılı Piyasa Gelişim Raporu, T.C. Enerji Piyasası Düzenleme Kurulu, Strateji Geliştirme Dairesi Başkanlığı, Ankara, 2016. URL: (<http://epdk.gov.tr>) (Erişim Tarihi: 22 Aralık 2020).
- [59] Elektrik Piyasası 2016 Yılı Piyasa Gelişim Raporu, T.C. Enerji Piyasası Düzenleme Kurulu, Strateji Geliştirme Dairesi Başkanlığı, Ankara, 2017. URL: (<http://epdk.gov.tr>) (Erişim Tarihi: 22 Aralık 2020).
- [60] Elektrik Piyasası 2017 Yılı Piyasa Gelişim Raporu, T.C. Enerji Piyasası Düzenleme Kurulu, Strateji Geliştirme Dairesi Başkanlığı, Ankara, 2018. URL: (<http://epdk.gov.tr>) (Erişim Tarihi: 22 Aralık 2020).
- [61] Elektrik Piyasası 2018 Yılı Piyasa Gelişim Raporu, T.C. Enerji Piyasası Düzenleme Kurulu, Strateji Geliştirme Dairesi Başkanlığı, Ankara, 2019. URL: (<http://epdk.gov.tr>) (Erişim Tarihi: 22 Aralık 2020).
- [62] Elektrik Piyasası 2019 Yılı Piyasa Gelişim Raporu, T.C. Enerji Piyasası Düzenleme Kurulu, Strateji Geliştirme Dairesi Başkanlığı, Ankara, 2020. URL: (<http://epdk.gov.tr>) (Erişim Tarihi: 22 Aralık 2020).
- [63] Elektrik Piyasası Sektör Raporu, Ekim 2020, T.C. Enerji Piyasası Düzenleme Kurulu, Strateji Geliştirme Dairesi Başkanlığı, Ankara, 2020. URL: (<http://epdk.gov.tr>) (Erişim Tarihi: 22 Aralık 2020).
- [64] Bahadır Karabekiroğlu, RWE AG (Görüşme Tarihi: 05 Şubat 2021).
- [65] Borusan EnBW URL: (<https://www.borusanenbw.com.tr/basin-odasi>) (Erişim tarihi: 27.11.2020).
- [66] Toyota URL: (<https://www.toyota.com.tr/world-of-toyota/news/toyota-idari-binalarinda-yenilenebilir-enerji-kullanacak.json>) (Erişim Tarihi: 27.11.2020).
- [67] EnerjiSA URL: (<https://m.enerjisa.com.tr/tr/enerjisa-hakkinda/medya-merkezi/basin-bultenleri/esarj--uluslararası-yesil-enerji-sertifika-irec-ile-bir-ilki-daha-gerçekleştirdi>) (Erişim Tarihi: 27.11.2020).
- [68] L. Bird, J. Heeter, C. Kreyck, Solar Renewable Energy Certificate (SREC) Markets: Status And Trends.
- [69] Erdem Sezer, Aksa enerji (Görüşme Tarihi: 07.01.2021).
- [70] Serkan Dündar, Entek Enerji (Görüşme Tarihi: 22.01.2021).

Mustafa ÖZCAN



Dr. Mustafa ÖZCAN, 1979 yılında İstanbul'da doğdu. 2000 yılında Marmara Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektrik Eğitimi bölümünden Teknik Öğretmen ünvanı ile mezun oldu, Aventis ilaç firması Elektrik-Elektronik bakım atölyesinde kısa bir süre çalıştıktan sonra Şişli Teknik ve Endüstri Meslek Lisesi Elektrik Bölümünde Teknik öğretmen olarak çalışmaya başladı.

2002-2006 yılları arasında Bahçeşehir Üniversitesi Meslek Yüksek Okulu Elektrik Bölümünde yarı zamanlı öğretim görevlisi olarak dersler verdi. 2004 yılında Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Eğitimi Programından Y.Lisans (M.Sc.) derecesi aldı. 2008-2013 yılları arasında Kocaeli Üniversitesi Elektrik Mühendisliği Ana bilim dalından doktora eğitimini tamamladı ve doktora (Ph.D.) derecesi aldı. 2018 yılında Kocaeli Üniversitesinde tam zamanlı öğretim üyesi olarak çalışmaya başladı. Eğitim, mesleki ve teknik eğitim ve mühendislik alanlarında düzenlenen eğitim ve bilimsel toplantılara katılmak amacıyla birçok avrupa ülkesinde bulundu. Avrupa Birliği projelerine yürütücü ve katılımcı olarak katıldı. Mesleki ve Teknik eğitim ve mühendislik alanlarında ulusal ve uluslararası yayınları bulunmaktadır. Kocaeli Üniversitesinde çalışmalarını devam ettirmektedir.

Burcu ERGÜN



Burcu ERGÜN, lisans derecesini 2017 yılında Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümü'nde tamamladı. 2018 yılında C sınıfı İş Güvenliği Uzmanlığı'nı aldı. 2020 yılında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Programı'nı Prof. Dr. Hakan Pekey danışmanlığında "Koku Kirliliğinin Olfaktometre ile Belirlenmesi ve Dağılımlarının Modellenmesi: Kocaeli Örneği" başlıklı bitirme tezi ile tamamladı. Bu süreçte geri dönüşüm ve danışmanlık sektörlerinde farklı pozisyonlarda görev aldı. 2020 yılında başladığı Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı Doktora Programı'na Prof. Dr. Beyhan Pekey danışmanlığında devam etmektedir.

Elif OCAKLI



Elif OCAKLI, lisans derecesini 2020 yılında Kocaeli Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü'nde tamamladı. 2020 yılında başladığı Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Programı'nı Doç. Dr. Mustafa ÖZCAN danışmanlığında devam etmektedir. Şu anda özel bir sektörde çalışmaktadır.

Dijital Kontrollü Yumuşak Mod Geçişli Dört Anahtarlı Bir Alçaltıcı-Yükseltici Çevirici Tasarımı

Design of a Digitally Controlled Four-Switch Buck-Boost Converter with Smooth Mode Transition

Burak ÇAYKENAR¹, Bünyamin TAMYÜREK²



¹Aselsan A.Ş., Ankara, Türkiye
bcaykenari@aselsan.com.tr

²Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Ankara, Türkiye
btamyurek@gazi.edu.tr

Öz

Bu çalışmada dijital kontrollü geniş giriş gerilim aralıklı, yüksek güç yoğunluklu ve verimliliğe sahip bir dört anahtarlı alçaltıcı-yükseltici çevirici (4AAY) yumuşak mod geçişli olarak tasarlanmıştır. Çalışma kapsamında değişken giriş gerilimlerine göre topolojinin mod değişimleri sırasında yaşamış olduğu problemler MATLAB/Simulink ortamında geliştirilen simülasyonlar ve gerçek zamanlı testler ile detaylıca incelenmiş ve literatürde önerilen yöntemlerden daha iyi performans sergileyen yeni bir yumuşak geçiş yöntemi önerilmiştir. Kontrol sinyalindeki kararsızlıklar, ölü bölge olarak adlandırılan zamanda çıkış geriliminin regülasyon olmadan giriş gerilimini izlemesi, çıkış gerilimindeki dalgalanma ve harmonikler, anahtarlardaki darbe atlamaları mod geçişlerinde karşılaşılan önemli problemler olarak sıralanabilir. Mod geçişlerindeki bu problemler topolojinin verimliliğini, regülasyonunu ve kontrolcü kararlılığını olumsuz yönde etkilemektedir. Böylece, önerilen yöntem ile bu problemlerin istenmeyen etkileri minimuma indirilmiştir. Bu kazanımlara ek olarak bu çalışmada bootstrap teknolojisini kullanan anahtar sürücü devrelerinde karşılaşılan senkron anahtarlardan üstte bulunan anahtarın sürekli yani %100 doluluk oranı ile iletimde kalamama problemi için de yenilikçi bir çözüm önerisi sunulmuştur. Geliştirilen çözümlerin doğrulaması simülasyon ve deneysel olarak yapılmış ve sonuçların üstünlüğü literatürdeki diğer çalışmalar ile kıyaslanarak ortaya konulmuştur.

Anahtar kelimeler: Dört Anahtarlı Alçaltıcı-Yükseltici Çevirici, Yumuşak Mod Geçişli, DA/DA Çevirici, Dijital Kontrol, Kapı Sürme

Abstract

In this study, a digitally controlled four-switch buck-boost converter (4SBB) that has a wide input voltage range, high power density and efficiency is designed with smooth mode transition. Within this scope, the problems encountered during mode changes under varying input voltage have been investigated and thoroughly defined via the simulations performed in MATLAB/Simulink and the tests obtained from an

experimental converter. The instabilities at the control signal, the appearing of input voltage at the output without any regulation during the intervals called the dead-zone, the fluctuations and harmonics at the output voltage, the pulse skipping of switches can be listed as the major problems encountered during mode transitions. These problems negatively affect the efficiency of converters, regulation and controller stability. Therefore, in this study a new smooth transition method is proposed with many advantages over the state-of-the-art methods. The negative effects of these problems are all minimized with the proposed method. In addition to these achievements, an innovative solution is presented for the problem of inability to keep the top synchronous switch always ON with 100% duty, which is encountered in gate driver circuits using the bootstrap technology. The superiority of the developed technologies is demonstrated by comparing the results with the state-of-the-art methods.

Keywords: Four-Switch Buck-Boost Converter, Smooth Mode Transition, DC/DC Converter, Digital Control, Gate Drive

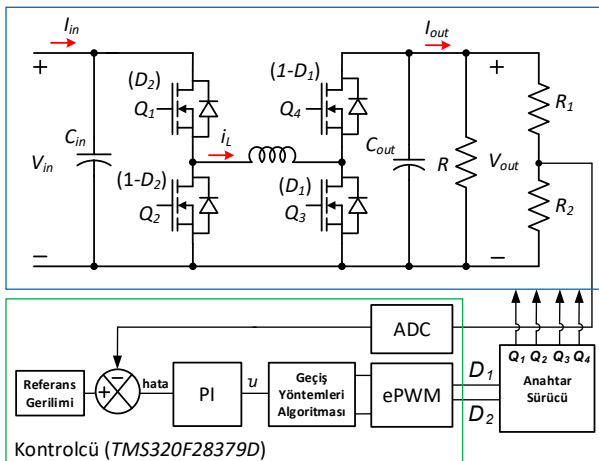
1. Giriş

Dört anahtarlı alçaltıcı-yükseltici çevirici geniş giriş gerilim aralığı, yüksek verimlilik ve güç yoğunluğu, düşük hacimde tasarlanabilme, pozitif çıkış polaritesi özelliklerinden dolayı çoğu uygulamada tercih edilen bir çevirici mimarisidir. Flyback ve Forward topoloji yapılarındaki gibi ekstra trafoya ihtiyaç duyulmaz ve yüksek güçlerde çalışabilir. Cuk topolojisine nazaran çıkış gerilimi pozitifdir. SEPIC'e göre ise çıkış akımı darbeleri olmadığı ve girişteki enerjiyi kapasitör üzerinden çıkışa aktarmadığı için malzeme akım limitlerinin yüksek olmasına gerek yoktur. Bunlara ek olarak Cuk ve SEPIC topolojilerinde ekstra bobin ve kapasitör kullanımına bağlı olarak ekstra hacim kaplama ve enerji dönüşümlerinde yüksek güç kayıpları mevcuttur. Şekil 1'de kontrolcü yapısıyla beraber dört anahtarlı alçaltıcı-yükseltici çeviricinin genel devre şeması verilmiştir. Dört anahtarlı yapıya nazaran literatürde yaygın olarak kullanılan tek ve iki anahtarlı alçaltıcı-yükseltici topolojileri de bulunmaktadır. Tek anahtarlı alçaltıcı-yükseltici topolojisi temel olarak tek anahtar, diyot ve bobinden oluşur ve basit bir yapıya sahiptir. En büyük dezavantajı çıkış geriliminin polaritesinin negatif olmasıdır. Bununla birlikte topoloji yapısı

gereği anahtar ve diyot üzerinde giriş ile çıkış gerilimlerinin toplam değeri görülmektedir. Bu da malzemeler üzerinde ekstra gerilim baskısına neden olur. İki anahtarlı alçaltıcı-yükseltici yapısı Şekil 1’de verilen topolojideki Q2 ve Q4 anahtarları yerine diyotlar kullanıldığında elde edilir. Anahtarlama durumları ve çalışma modları tamamen dört anahtarlı topoloji ile aynıdır. İki anahtarlı yapıdaki en büyük dezavantaj ise diyotlar üzerindeki iletim kayıplarının yüksek olmasından dolayı verimin düşük olmasıdır. Bu durum yüksek güçlü uygulamalarda daha da belirgindir. Diyotlar, iç dirençleri ($R_{DS(ON)}$) düşük olan senkron çalışan MOSFET’ler ile değiştirilerek bu dezavantaj çözülür. Bu çalışmada yüksek verim elde etmek amacı ile iki anahtarlı topoloji yerine dört anahtarlı alçaltıcı-yükseltici topolojisi tercih edilmiştir.

1.1. Çevirici Çalışma Modları

Dört anahtarlı alçaltıcı-yükseltici topolojisi giriş gerilimini istenilen seviyeye yükseltmek, düşürmek veya yakın seviyelerde tutmak için kullanılır. İki, üç veya daha fazla moda çalışabildiklerinden dolayı kullanım alanları oldukça geniştir. İki modlu çalışma yapısında alçaltıcı ve yükseltici modları bulunurken üç modlu çalışma yapısında ise bunlara ek olarak alçaltıcı-yükseltici modu da bulunmaktadır. İki modlu çalışma yapısında çevirici giriş gerilimini istenilen seviyelere düşürebilir veya yükseltebilir. Fakat giriş gerilimi çıkış gerilim seviyesine yakın olduğu durumda Bölüm 1.3’te detaylı olarak bahsedilen doluluk oranı kısıtlamalarından kaynaklı ölü bölge (dead-zone) adı verilen bir alan oluşur. Bu bölge içerisinde regülasyon yapılmadığı için çıkış gerilimi giriş gerilimini takip eder ve girişte oluşacak bir sorun direkt çıkışa yansır. Bu arzu edilmeyen bir problemdir. Bu problemi çözebilmek adına ölü bölgedeki alana alçaltıcı-yükseltici modu yerleştirilir. Bu durumda çevirici üç mod kontrollü yapıda çalışır. Mod geçişlerinde kararsızlıkları azaltmak ve kararlı regülasyon sağlayabilmek adına ölü bölge alanına eklenen alçaltıcı-yükseltici modu da kendi içerisinde iki ayrı bölge halinde incelenebilir. Bu yapıldığında ise çevirici dört mod kontrollü yapıda çalışmış olur.

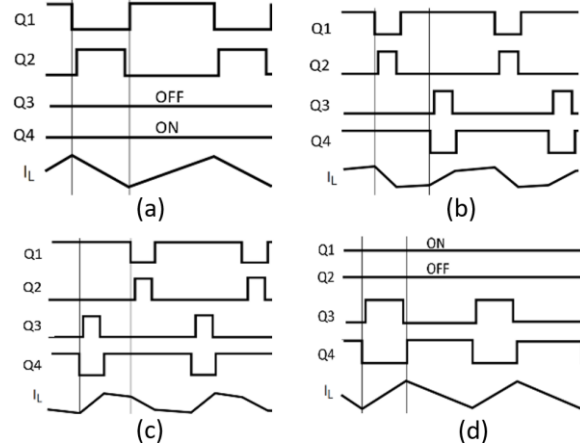


Şekil 1: Alçaltıcı-Yükseltici Çevirici Sistemi

[1]’e göre geleneksel üç mod kontrol yapılarıyla dört mod kontrol yapısı incelenmiş, dört mod kontrol yapısının bobin dalgalanma akımı (ripple), bobin ortalama akımı, bobin RMS akımının daha düşük olduğu, bunun sonucunda da çevirici verimliliğinin yüksek olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bu sebeple

bu çalışma kapsamında önermiş olduğumuz yöntemde dört anahtarlı alçaltıcı-yükseltici çeviricisi dört moda çalışacak şekilde doluluk oranları değerleri Bölüm 3’te verilen Şekil 4’teki gibi tasarlanmıştır. Ayrıca bu çalışma kapsamında üç mod ile dört mod yapılarının karşılaştırılması yapılmamıştır. Karşılaştırma yapılan diğer çalışmaların da dört mod kontrol yapısını kullandığı görülmüştür.

Şekil 1’e göre Q1 ve Q2 alçaltıcı modun anahtarları olarak isimlendirilirler ve bu moda Q1 ana anahtar ve Q2 senkron anahtar olarak çalıştırılır. Q3 ve Q4 yükseltici modun anahtarları olarak isimlendirilirler ve bu moda da Q3 ana anahtar ve Q4 senkron anahtar olarak çalıştırılır. Çalışmamızda kullandığımız dört modlu yapıdaki modlar ise; alçaltıcı ($V_{in} > V_{out}$), genişletilmiş alçaltıcı ($V_{in} \geq V_{out}$), genişletilmiş yükseltici ($V_{in} \leq V_{out}$) ve yükseltici ($V_{in} < V_{out}$) olarak isimlendirilmiştir. Bölüm 3’te doluluk oranları üzerinde bu modlar detaylı olarak numaralandırılmış ve hangi moda hangi doluluk oranının çalıştığı belirtilmiştir. Çeviricinin dört moddaki çalışma prensibi ve anahtarların durumları Şekil 2’de verilmiştir. Sırası ile Şekil 2(a)’da alçaltıcı mod, 2(b)’de genişletilmiş alçaltıcı, 2(c)’de genişletilmiş yükseltici ve 2(d)’de ise yükseltici mod anahtarlama ve indüktör akım grafikleri [2] gösterilmiştir. Anahtarlama karakteristiklerine göre indüktör akım dalgalanmasının değiştiği görülebilir. Ayrıca anahtar durumlarına göre bobin girişten beslenerek enerjilenir veya üzerindeki enerjisini yüke aktarır.



Şekil 2: Anahtarlama ve Bobin Akım Şekilleri [2]
a) Alçaltıcı b) Genişletilmiş alçaltıcı c) Genişletilmiş yükseltici d) Yükseltici mod

1.2. Kontrolcü Seçimi ve Kısıtlamaları

Değişken giriş gerilimlerine karşı çıkışı arzu edilen seviyede tutarak regülasyonu sağlayabilmek ve anahtarları modlara göre sürebilmek için kapalı çevrim kontrol yöntemlerine ihtiyaç vardır. Bu çalışma kapsamında analog kontrolcülere nazaran, kolay erişilebilirlik, maliyet, esneklik, kontrol edilebilirlik, koruma, gerçek zamanlı çalışabilme ve müdahale özelliklerinden dolayı dijital kontrolcü tasarımı tercih edilmiştir. Dijital kontrolcü tasarımı iki farklı yöntemle yapılabilir. İlkinde, önce analog tasarım yapılır ardından dijital dönüşümler uygulanır. İkincisi ise direkt dijital tasarımdır. İlkinde matematiksel dönüşümler fazlaca yapıldığı için zaman kaybı oluşturur ve bazı dinamiklerin gözden kaçırılmasına neden olabilir. Ayrıca tasarımda küçük bir değişiklik ihtiyacı olduğunda tüm kontrolcü tasarımındaki bu matematiksel

dönüşüm ve hesaplamaları tekrar yapmak gerekir. Bu nedenlerden dolayı bu çalışmada, MATLAB/Simulink kontrol araç kutusu kullanılarak direkt dijital tasarım yapılmıştır.

Kontrolcü tasarımındaki diğer önemli parametrelerden birisi de kontrolcü tipinin ne olacağıdır. Yaygın olarak literatürde akım ve gerilim mod geri besleme döngüsü kullanılmaktadır. Tek döngülü yapısı, gürültüden az etkilenmesi, mod geçiş uygulaması için kolay uygulanabilir olmasından dolayı bu çalışmada geri besleme döngüsü için çevirici sürekli akım modunda (CCM) çalışacak şekilde tasarlanarak gerilim mod kontrol tercih edilmiştir. Gerilim mod kontrolde, [3]'e göre yükseltici ve alçaltıcı-yükseltici modlarının küçük sinyal transfer fonksiyon karakteristiklerine bakıldığında paylarında sağ yarım düzlemde bulunan bir sıfırın varlığı dikkat çeker. Sağ yarım düzlemde bulunan sıfırın bode diyagramlarındaki kazanç payı sol yarım düzlemdekiyle aynıdır. Fakat faz payı sisteme +90° yerine -90° olarak eklenmektedir. Negatif olarak eklenen bu faz payı değerinden dolayı sistemi kontrol etmek ve kararlı hale sokmak oldukça güçtür. Bu sıfırın varlığından dolayı genel sistem "Minimum Faza Sahip Olmayan Sistem" olarak da adlandırılır [4]. Topoloji üzerindeki etkisi ise yükseltici çevirici modeli düşünülerek anlatılabilir. Yükseltici topolojide ortalama çıkış akımının Denklem (1)'de verildiği gibi ortalama bobin akımı ve doluluk oranı değerine bağlı olarak değiştiği görülmektedir. Burada I_L , ortalama bobin akımının değerini; D parametresi ise kararlı hal durumundaki doluluk oranını belirtmektedir.

$$I_{OUT} = I_D = I_L(1 - D) \quad (1)$$

$$D = \frac{V_o - V_{in}}{V_o} \quad (2)$$

Denklem (2) ise doluluk oranının ortalama çıkış ve giriş gerilimi ile olan ilişkisini vermektedir. Yükseltici mod çalışmada giriş gerilim değeri herhangi bir nedenden dolayı azalır, Denklem (2)'ye göre doluluk oranı (D) artacaktır. Artan bu doluluk oranı Denklem (1)'deki $(1 - D)$ ifadesinin değerini azaltır. Çıkış akımının ve böylece çıkış gücünün sabit kalabilmesi için I_L değerinin de aynı oranda artması gerekir. Buradaki temel problem bobin akımının artış hızının belirli bir limitle sınırlandırılmış olmasıdır. Eğer bobin akım değerinin değişimi ($\frac{dI_L}{dt}$), doluluk oranı değişimi hızından ($\frac{dD}{dt}$) daha az olursa, çıkış akımı (I_{OUT}) azalacaktır. Bu durum bobin akımının değişim oranı, doluluk oranının değişim oranını yakalayana kadar devam edecektir. Çıkış akım değerinin düşmesinden dolayı, çıkış gerilim değerinin de anlık olarak düştüğünü sezen kontrolcü, doluluk oranını hızlı bir şekilde artıracak yönde tepki verecektir ki bu tersi bir durumdur [5]. Bu durum çıkış gerilim toparlanma süresini olumsuz yönde etkilemektedir. Bu problemin çözümü için doluluk oranı değişim hızı veya kontrol bant genişliği (f_c) sınırlandırılmalıdır. Bant genişliğini kısıtlamak sağ yarım düzlem sıfırının etkisini düşürürken, kontrolcünün sisteme olan etkilere hızlı cevap verme özelliğini de azaltır. Bu sebeple bant genişliği seçilirken hem anahtarlama gürültülerinden hem de sağ yarım düzlem sıfırından daha az etkilenmek adına Denklem 3 ve 4'teki eşitsizlikler dikkate alınmalı, kararlılık marjı ve faz payı arasında istenilen kriterlere uygun bir seçim yapılmalıdır. Bant genişliği değeri bu kısıtlamalar altında olabildiğince yüksek seçilmelidir [4-7]. Denklem (3)'te f_s anahtarlama frekansını gösterir. Bu denklemlerin verilmesindeki temel amaç bant genişliği frekansını hem anahtarlama (f_s) hem de sağ yarım düzlem sıfır

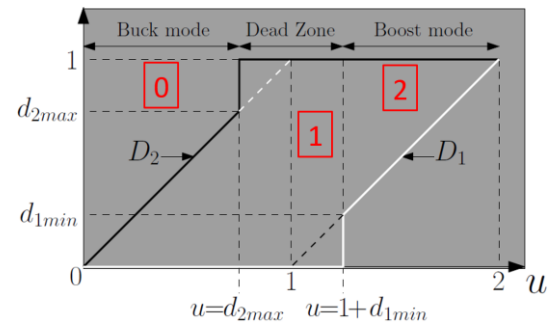
frekansından (f_{SYDS}) uzaklaştırarak, olumsuz etkilerinin sisteme daha az yansımaları sağlamaktır. Diğer bir çözüm yolu da topolojiyi süresiz akım modunda (DCM) çalıştırarak bu sıfırın etkilerini modun yapısı gereği minimize etmektir. Fakat bu modda, bobin akım dalgalanması ve RMS değerleri arttığı için tercih edilmemiştir.

$$f_c < \frac{f_s}{10} \quad (3)$$

$$f_c < \frac{f_{SYDS}}{10} \quad (4)$$

1.3. Problemin Tanıtımı

Dört Anahtarlı Alçaltıcı-Yükseltici çeviricilerin genel tasarımı literatürde sıklıkla yer alan olgunlaşmış bir konudur. Ancak bu çeviricilerin tasarımında dikkat edilmesi gereken ve çoğu kez göz ardı edilen önemli nokta modlar arası geçişin düzgün bir şekilde uygulanabilmesidir. Alçaltıcı mod ile yükseltici modun transfer fonksiyon karakteristikleri birbirinden farklıdır [3]. Ayrıca PWM'lerin doğrusal olmayan karakteristiklerinden, anahtarlama gürültülerinden, anahtarların iletme ve kesime girme arasındaki zaman farklarından (dead time), kontrol döngüsünde ve anahtar sürücü yapılarında oluşan zaman gecikmelerinden, PCB hatalarından kaynaklı ideal alçaltıcı mod doluluk oranı değeri (D_2) %100, ideal yükseltici mod doluluk oranı değeri (D_1) %0 olamayacaktır [3], [8-10]. Özetle doluluk oranı değerleri sayılan sebeplerden ötürü kısıtlanır. Hem transfer fonksiyonlarındaki farklılık hem de doluluk oranı kısıtlamalarından dolayı mod geçişlerinde kararsızlık noktaları oluşur. Oluşan bu kararsızlık noktalarındaki doluluk oranı sıçramaları neticesinde ölü bölge (dead-zone) adı verilen regülasyonun ve kontrolün sağlanmadığı bir alan oluşur. Şekil 3'te 0 alçaltıcı modu, 1 ölü bölgeyi, 2'de yükseltici modu göstermektedir. Ölü bölge içerisinde $D_2 = 1$ ve $D_1 = 0$ olduğu yani giriş geriliminin regülasyon olmadan çıkışa aktarıldığı söylenebilir.



Şekil 3: Ölü bölgede doluluk oranı karakteristiği [9]

Regülasyonun bu alanda kontrol edilememesi sistemde istenmeyen bir durum olduğunda kararsızlığa ve regülasyon bozukluğuna neden olur. Ayrıca doluluk oranı kısıtlamalarından dolayı ortaya çıkan ani sıçramalar çıkış geriliminde dalgalanma ve kararsızlıklar oluştururken anahtarlarda da darbe atlamalara neden olur [8-10]. Şekil 1'deki mevcut güç modeline göre Şekil 2'de belirtilen ölü bölge analizi uygulama üzerinde test edilememektedir. Bu analizin yapılamamasının temel nedeni 1 numaralı bölgedeki karakteristikten dolayı giriş gerilimini direkt çıkışa aktaran ekstra bir anahtara (bypass) ihtiyaç duyulmasıdır. Bu sebeple bu çalışma kapsamında ölü bölge analizi için Benzetim ve

Uygulama bölümünde sadece MATLAB/Simulink'te elde edilen simülasyon sonuçları verilmiştir.

1.4. Literatür Özeti

Literatürde modlar arası yumuşak geçişle ilgili ve ölü bölge diye tabir edilen bölgenin sisteme negatif etkilerini gösteren ve çözüm önerileri sunan oldukça fazla araştırma ve yayın bulunmaktadır. Bunlardan en yaygın olanları alçaltıcı ve yükseltici modların birleştirildiği yöntemlerdir [11-16]. Bu yöntemler topoloji transfer fonksiyonlarındaki kararsızlık noktalarını azaltır. Ana dezavantajları ise çıkış gerilim dalgalanmalarına ve alt harmoniklere olan azaltıcı etkileri düşüktür ve çoğu dijital kontrol uygulamaları için uygun değildir. [10], [17]'de alçaltıcı ve yükseltici modların, alçaltıcı modun alabileceği maksimum doluluk kırpılarak birleştirilmesinden bahsedilmiştir. Bu yöntemin dezavantajı ise alçaltıcı-yükseltici modda çıkış gerilim dalgalanmasının azalmasına rağmen, yükseltici moda göre verimliliğin düşmesidir. Dijital kontrolcüler için uygulanabilir ve literatürde önerilen yöntemlere nazaran geçişler için daha yenilikçi yöntemler sunan çalışmalar ise [8-9], [18-19]'da verilmiştir. [18]'e göre mod geçişlerinde alçaltıcı ve yükseltici mod doluluk oranları $D_2 = D_1 = 0,5$ olarak seçilmiştir. Bobin üzerindeki enerjiyi Q1 ve Q3 anahtar kesimde olduğunda yüke aktarır. Bu durumda çıkış akımının ortalama değeri Denklem (1)'deki gibi olacaktır. D 'ye 0,5 yazıldığında, $I_L = 2 I_O$ bulunur. Bobin ortalama akım değeri arttığı için, bobin iletim kayıpları artar. Bu nedenle [18]'in önermiş olduğu yöntem için mod geçişlerinde verimlilik düşük olur.

[8] ve [20]'de mod değişim algoritmalarının birbiriyle aynı olduğu görülmektedir. Buradaki temel amaç doluluk oranı kısıtlamalarından dolayı ortaya çıkan doluluk oranı sıçramalarını kompanze edecek şekilde aksiyon alınmış olmasıdır. Örneğin D_1 doluluk oranı ani artarken, D_2 doluluk oranı buna tepki vererek belirli ölçüde azaltılmış ve bu artışın etkisi dengelenmeye çalışılmıştır. Buradaki en büyük dezavantaj geçişlerde histerezis yapılarının bulunmayışıdır. Bu sebeple kontrolcü kararsız kaldığında sürekli olarak modunu değiştirebilir. [9] ise ölü bölgeden kurtulabilmek için birden fazla yöntem önermiştir. Çalışma kapsamında önermiş olduğu ana yöntem histerezisli yapıya sahip olmalıdır. Temelinde mod geçiş noktalarında histerezis yapısını kullanarak doluluk oranı sıçramalarında oluşabilecek kontrolcü kararsızlıklarında çeviricinin sürekli olarak mod değiştirmesini engellemek istemiştir.

Bu çalışma kapsamında literatürde iyi bilinen (state-of-the-art) iki yöntem [8], [9] incelenmiş ve bu yöntemlere göre daha üstün özellikleri ve avantajları olan yeni bir yöntem önerilmiştir. Önerilen yöntem, literatürde iyi bilinen bu iki yöntemle karşılaştırılmış ve performansının daha iyi olduğu hem simülasyon ile hem de deneysel olarak gösterilmiştir.

2. Kontrolcü Tasarımı

Bu çalışmanın amacı 4AAY'de geçişler esnasında ortaya çıkan problemleri çözmek olduğu için topolojinin tasarım detayları ayrıntılı olarak verilmemiştir. Daha çok kontrolcü tasarımı ve kontrol algoritması geliştirilmesi üzerine yoğunlaşmıştır. Askeri projelerde, çevirici girişlerinde akü, güneş panelleri, bataryalar gibi değişken giriş gerilimlere sahip besleme kaynakları kullanılması ve çıkışta sabit gerilim istenirinin bulunmasından dolayı giriş gerilim aralığı 10-42 V, çıkış gerilimi ise sabit 28 V olarak seçilmiştir. Tablo 1'de kullanılan tasarım parametreleri gösterilmektedir.

Tablo 1: Tasarım Parametreleri

Sembol	Tanım	Değer
L	Bobin	10 μ H
C_{out}	Çıkış Kapasitansı	440 μ F x 3
C_{in}	Giriş Kapasitansı	8x2,2 μ F /1x100 nF
V_{p-p}	Gerilim Dalgalanması	%1<
R	Yük	11.2 Ω
V_{in} / V_o	Giriş / Çıkış Gerilimi	10-42 V / 28 V
f_s	Anahtarlama frekansı	250 kHz

Şekil 1'de görüldüğü gibi ADC ile okunan çıkış gerilim değeri geri besleme döngüsü aracılığıyla arzu edilen değer ile kıyaslanır. Oluşan fark hata sinyali olarak adlandırılır. Ortaya çıkan hata sinyali 'PI' denetleyici vasıtasıyla düzeltilmektedir. 'P' katsayısının değerinin artırılması hatayı azaltırken, kararlılığı olumsuz yönde etkileyecek ve çıkış gerilim dalgalanma tepe değerinde istenmeyen bir artışa ve aşmaya (overshoot) neden olabilir. 'I' katsayısı ise hatayı ortadan kaldırırken, aşma gerilimini (overshoot) ve oturma zamanını artırır. Bu çalışmada 'D' yani türev katsayısı denetleyicide tercih edilmemiştir. Çünkü türev bileşeni, geri besleme döngüsünde meydana gelen gürültülerden fazlaca etkilenmektedir. Sinyal gürültülü veya kontrol döngü hızı yavaşsa türev bileşeni sistemi kararsız duruma sokabilir. Kullanılan PI kontrolcü yapısı Denklem (5)'te verilmiştir. Burada örnekleme oranı 250 kHz ve örnekleme süresi (T_s) 4×10^{-6} saniyedir. Örnekleme frekansı ile anahtarlama frekansı aynı seçilmiştir.

$$PI = P + I \cdot T_s \cdot \frac{z}{z-1} \quad (5)$$

$$f_{SYDS} = \left(\frac{V_{in}}{V_o}\right)^2 \cdot \left(\frac{R}{2\pi L}\right) \quad (6)$$

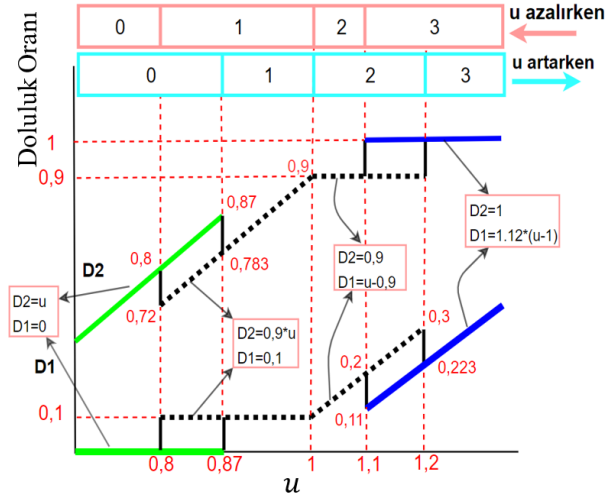
Denklem (4)'te gösterilen bant genişliği frekansıyla ilişkisi gösterilen sağ yarım düzlem sıfır frekansının (f_{SYDS}) formülü Denklem (6)'da verilmiştir. Sağ yarım düzlem sıfır frekansı, bant genişliği değerine yaklaştıkça bu sıfırın kontrol sistemine olan olumsuz etkileri artar. Bu sebeple sıfır frekansının alabileceği en düşük değer (worst-case-scenario) giriş gerilim değerinin minimum, çekilen akımın maksimum olduğu durumda oluşur. Tablo-1'de verilen değerler kullanılarak $f_{SYDS} = 22,736$ kHz olarak bulunmuştur.

P ve I katsayılarının bulunma işlemi MATLAB/Simulink 'PID Tuner' uygulaması ve 'Kontrol Araç Kutusu' kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Denklem (3) ve (4)'teki ifadelerin sağlanabilmesi için program üzerinde bant genişliği frekansı $f_c = 634$ Hz, kararlı bir kapalı döngü sisteminin sağlanabilmesi için faz payı 63° olarak seçilmiştir. Bu bilgiler çerçevesinde 'PID Tuner' ile P katsayısı 0,01203 ve I katsayısı ise 29,33 olarak bulunmuş ve tasarımda kullanılmıştır.

3. Önerilen Yumuşak Geçiş Yöntemi

Şekil 1'e göre PI bloğu çıkışında oluşan sinyal kontrolcü sinyali (u) olarak adlandırılır. Bu sinyal geçiş yöntemleri algoritması bloğuna girer. Algoritma bloğu içerisinde doluluk oranları D_2 ve D_1 değerleri önerilen karakteristik yöntemlere göre ayarlanarak EPWM aracılığıyla anahtarların sürülmesi sağlanır. D_2 doluluk oranı alçaltıcı kısmın anahtarlarını (Q1,

Q2), D_1 doluluk oranı ise yükseltici kısmın anahtarlarını (Q3, Q4) kontrol eder. Şekil 4'te mod geçişleri için bu çalışma kapsamında önerilen doluluk oranı karakteristikleri verilmiştir.



Şekil 4: Önerilen yöntem için doluluk oranı karakteristiği

Kontrolcü sinyalinin (u) artmasına ve azalmasına bağlı olarak mod geçişleri sağlanmaktadır. Her iki yönlü hareket içinde 0 alçaltıcı modu, 1 genişletilmiş alçaltıcı modu, 2 genişletilmiş yükseltici modu ve 3 yükseltici modu göstermektedir. D_1 ve D_2 doluluk oranlarının alabileceği değer aralığı $0 \leq D_1, D_2 \leq 1$ olur. Kontrolcü sinyali bu durumda $0 < u < 2$ ile ifade edilebilir. Alçaltıcı modun kontrol aralığı $0 < u < 1$ olurken, yükseltici modun kontrol aralığı $1 < u < 2$ yazılabilir. Alçaltıcı mod için $D_1 = 0$, $D_2 = u$, yükseltici mod için $D_1 = u - 1$, $D_2 = 1$ olarak u cinsinden yazılabilir. Alçaltıcı-yükseltici moddaki giriş-çıkış transfer fonksiyonu ve kazanç ifadesi Denklem (7)'de verilmiştir. Burada $D_{2,max}$, alçaltıcı modun alabileceği maksimum değeri, $D_{1,min}$ yükseltici modun alabileceği minimum değeri ifade eder. Şekil 2 üzerinde bulunan karakteristik denklemlerin çıkarılması genişletilmiş alçaltıcı mod için Denklem (8), genişletilmiş yükseltici mod için ise Denklem (9) kullanılarak elde edilmiştir. D_2' ve D_1' ilgili bölgelerde bulunacak olan doluluk oranı değişkenlerini gösterir. $D_{1,anlıkdeğer}$ ise D_1 doluluk oranı ifadesinin hesaplanan andaki değerini gösterir.

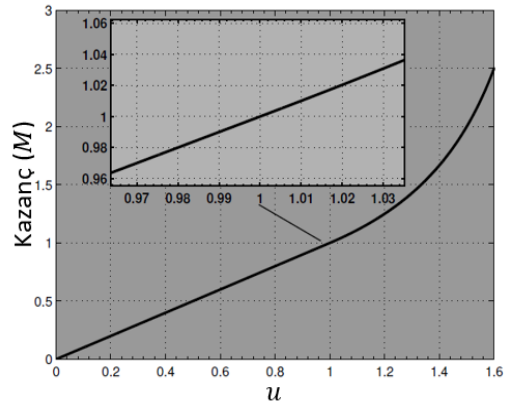
$$M = \frac{V_o}{V_i} = \frac{D_2}{D_1} = \frac{D_{2,max}}{1-D_{1,min}} \quad (7)$$

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{D_2'}{1-D_{1,min}} \quad (8)$$

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{D_{2maks}}{1-D_{1,anlıkdeğer}} = \frac{1}{1-D_1'} \quad (9)$$

Doluluk oranı kısıtlamalarından dolayı mod geçişlerinde doluluk oranlarında ani sıçramalar ortaya çıkar. Oluşan bu sıçramalar beraberinde çıkış geriliminde hem AA hem DA incelemedeki dalgalanma ve harmonik bileşenlere, anahtarların düzgün işlevini yerine getirememesine, darbe atmalara, regülasyon bozukluklarına ve ölü bölgenin (dead-zone)

oluşmasına sebebiyet verir. Önerilen yöntemdeki temel amaç doluluk oranlarında oluşan bu ani sıçramaların topolojiye olan negatif etkilerini minimize etmek veya ortadan kaldırmaktır. Bunu başarabilmek için ise sıçramanın yaşandığı doluluk oranı değeri diğer doluluk oranı değeri ile kompanse edilerek sıçramanın topolojiye olan etkisinin azaltılması amaçlanmıştır. Bunun yanında mod geçişlerinde oluşabilecek kontrolcü sinyali (u) kararsızlıklarından dolayı çeviricinin sürekli olarak mod değiştirmesini engellemek ve bu mod geçişlerinde oluşabilecek gerilim dalgalanmalarını ortadan kaldırmak için histerezis yapıları kullanılmıştır. Mod geçişlerinde beklenen ideal kazanç- u grafiğinin Şekil 5'teki gibi olması beklenir. Şekle göre ideal durumda doluluk oranı sıçramaları bulunmadığı için kazanç çizgisinin parabolik olduğu ve herhangi bir sıçrama yapmadığı görülebilir. Önerilen yöntem ile kazanç- u grafiğinin ideal duruma benzer olması hedeflenmiştir.



Şekil 5: İdeal kazanç-kontrolcü (u) grafiği [9]

Literatürde iyi bilinen [8] ve [9]'da önerilen yöntemlere göre bu çalışma kapsamında önermiş olduğumuz yöntemin fazlaca avantajı bulunmaktadır. [8]'deki en büyük eksiklik mod geçişlerinde histerezis yapılarının bulunmamasıdır. Bu durumda kontrolcü sinyali (u) kararsızlıklarında çevirici sürekli olarak modunu değiştirerek çıkış geriliminde dalgalanma (ripple) oluşmasına neden olacaktır. [9]'daki en büyük eksiklik ise doluluk oranlarının birbirini kompanse edecek şekilde ayarlanmamış olmasıdır. Doluluk oranları sıçramaların etkilerini minimize edecek şekilde ayarlanmadığı için bu sıçramaların olumsuz etkileri çıkış geriliminde anlık aşım (overshoot) ve gerilim dalgaları (ripple) oluşmasına ve anahtarlamalarda darbe atmalara neden olur.

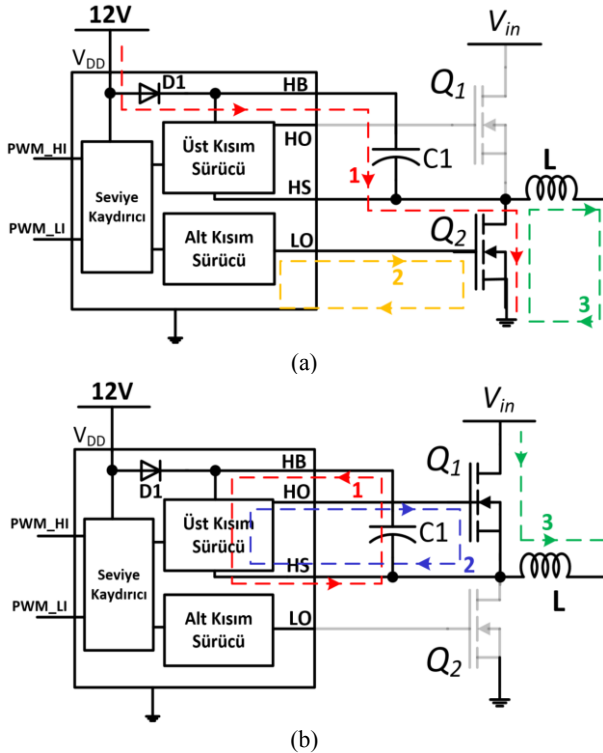
Önermiş olduğumuz yöntemde doluluk oranı kompozasyonu ve histerezis yapıları birlikte kullanılarak ortaya çıkan problemlere çözüm getirilmiştir. Ayrıca mod geçişlerinde oluşan çıkıştaki gerilim dalgalanmasının ve kontrolcü sinyalindeki kararsızlık noktalarının sayısının azaltılması hedeflenmiştir. Önermiş olduğumuz yöntemin eksik yanı ise $u = 1$ noktasında histerezis yapısı bulunmadığı için çevirici bu alanda sürekli olarak modunu değiştirerek AA incelemede çıkışta gerilim dalgalanması oluşturur. Bu sorunun çözümü için ilgili noktanın bulunduğu alana histerezis yapısı yerleştirilebilir. Bu çalışma kapsamında bu problemin çözümü incelenmiştir.

Şekil 1'de gösterilen anahtarların düzgün bir şekilde iletme ve kesime girebilmesi için yüksek akım kapasiteli anahtar sürücü entegrelerine gereksinim duyulmaktadır.

Fakat hem alçaltıcı hem de yükseltici modlarda anahtarlama görevi üstlenmeyen anahtarlardan üst kısımda bulunan anahtarın tamamen iletimde (%100), alt kısımda bulunan anahtarın ise kesimde (%) olması gerekmektedir. Anahtar sürücü entegrelerinde bulunan bootstrap kapasitörünün üst kısımdaki anahtarı iletime sokabilmesi için belirli aralıklarla şarj edilmesi gerekmektedir. Bu nedenle üst kısımda bulunan anahtar hiçbir zaman %100 iletime geçirilemez. Bu sorunun çözümü için de yeni bir tasarım önerilmiştir.

4. Bootstrap Tabanlı Anahtar Sürücü Entegrelerinde Üst Anahtarın %100 Dolulukla Açılmama Problemi ve Problemin Çözümü

Yüksek güç gerektiren uygulamalarda güç anahtarları düşük çıkış akım kapasitesine sahip olan entegreler veya mikroişlemciler tarafından sürülemez. Çünkü kapı (gate) bacağındaki kapasitenin, anahtarı iletime sokabilmek için yeterince hızlı bir şekilde şarj edilmesi gerekmektedir. Çıkışlarındaki yetersiz akım kapasitelerinden dolayı kapasitenin şarj edilme süresi anahtarlama süresinden daha uzun sürerse, anahtarlar düzgün çalışmaz. Bu problemi çözebilmek için yüksek akım kapasitesine sahip anahtar sürücü entegreleri kullanılır. Şekil 6'da tipik anahtar sürücü entegresinin yapısı verilmiştir.



Şekil 6: Anahtar sürücü entegresi (a) C_1 şarj durumu
(b) C_1 deşarj durumu

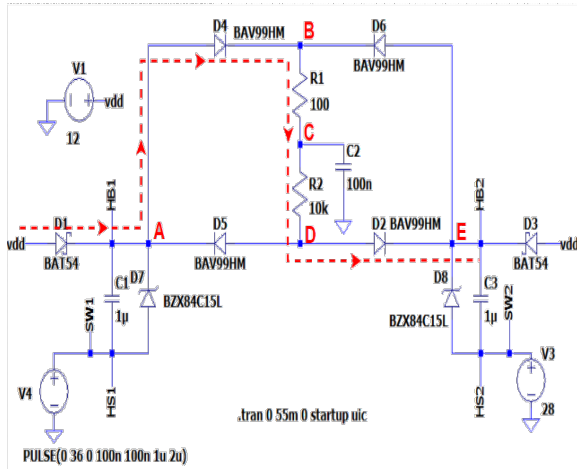
Şekil 6'da verilmiş olan anahtar sürücü entegresinde C_1 kapasitörü bootstrap kapasitör olarak adlandırılır. Ayrıca PWM_HI ve PWM_LI sinyalleri mikroişlemciden gelen giriş sinyalleridir. Temel olarak çalışma prensibi C_1 kapasitörünün şarj ve deşarj durumuna göre iki adımda incelenebilir. Şekil 6 (a)'da 2 numaralı döngüde alt anahtar sürücü bloğu Q2 anahtarını iletime sokar. 1 numaralı döngüde sürücü besleme

gerilimi (12V) C_1 kapasitörünü Q2 anahtarı üzerinden geçerek şarj eder. 3 numaralı döngüde ise bobin enerjisini çıkış tarafına aktarır. Şekil 6(b)'de ise Q1 anahtarı, C_1 kapasitörü üzerindeki depolanmış enerjiyle iletime geçer. 1 numaralı döngü bunu göstermektedir. 2 numaralı döngü ise üst anahtar sürücü yapısının C_1 kapasitörü vasıtasıyla anahtarı nasıl iletime soktuğunu gösteren döngüdür. 3 numaralı döngü ise Q1 anahtarı iletimdeyken besleme geriliminin bobin üzerinden geçerek yüke iletildiğini göstermektedir.

Çalışma prensibine göre C_1 kapasitörünün enerjilenip üstteki anahtarı açabilmesi için sürekli olarak şarj ve deşarj edilmesi gerekmektedir. Bu nedenle bootstrap tabanlı anahtar sürücü yapılarında üstte bulunan anahtarın tamamen (%100) iletime geçemeyeceği söylenebilir. Eğer C_1 kapasitörü, Q2 anahtarı iletimdeyken yeterince şarj edilemezse, Q1 anahtarını açacak gerilimi üzerinde depolayamayacaktır. Bu durum senkron anahtar yapılarında sıklıkla gözlemlenir. Literatürde [12], [20-21]'de verilen ve bu problemin çözümü için yaygın olarak kullanılan yöntem ise; Q1 ve Q2 anahtarlarının belirli zaman aralıklarında iletime ve kesime geçirilerek C_1 kapasitörünün şarj edilmesini sağlamaktır. Fakat bu çözümün dezavantajları bulunmaktadır. Doluluk oranı değeri, C_1 kapasitörünü şarj etmek için yeterli seçilmezse kapasitör yeterince şarj olamayacağı için Q1 anahtarı iletime geçemez. Doluluk oranı değeri fazla seçilirse de anahtarların iletim ve kesimde kalma süreleri artacağı için çevirici alçaltıcı veya yükseltici modda çalışmak yerine alçaltıcı-yükseltici modunda çalışmış olur. Bu durumda dört anahtar da çalışacağı için verimlilik düşer. Ayrıca bu anahtarlama yapmak kontrol yazılımına ek külfet getirir. Bu gibi problemleri çözebilmek için LTSpice ortamında kullanılan bootstrap yapıları anahtar sürücü yapısı için Şekil 7'deki devre kurulmuştur. Tasarımımızda 'UCC27211DDA' tip numaralı anahtar sürücü entegresi [22] 1 μF bootstrap kapasitörü seçilerek kullanılmıştır. Kapasitör seçim detayları ayrıntılı olarak verilmemiştir. Ayrıca uygulama aşamasında çevirici anahtarları (Q1, Q2, Q3, Q4) olarak da düşük iç direnç ve kapı kapasitansına, hızlı iletime ve kesime girme süresine sahip, seçilen anahtar sürücü entegresiyle ve yüksek frekans anahtarlama için uygun 'CSD18563Q5A' tip numaralı N kanal MOSFET seçilmiştir.

Şekil 7'ye göre C_1 , alçaltıcı kısımdaki anahtar sürücü bootstrap kapasitörünü gösterirken, C_3 ise yükseltici kısımdakini gösterir. C_1 ve C_3 her iki kısım için Şekil 6'da anlatılan C_1 kapasitörünün görevini üstlenmektedir.

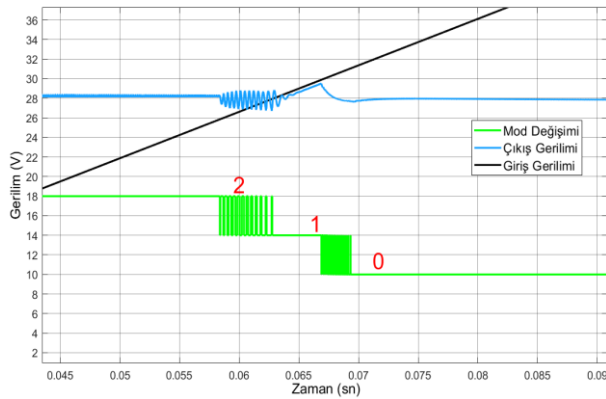
Kurulan devre yapısı A ile E noktaları arasındadır. A noktası alçaltıcı kısımdaki bootstrap kapasitörünün bağlantı noktasını (HB1) gösterirken, E noktası ise yükseltici kısımdakini (HB2) gösterir. Verilen şekilde çeviricinin alçaltıcı modda çalıştığı varsayılmıştır. Kurulan devre yapısındaki temel amaç çevirici alçaltıcı modda çalıştığı zaman yükseltici kısım üst anahtarını (Q4) tamamen (%100) iletimde, alt anahtarını (Q3) ise kesimde tutabilmektir. Bunu başarabilmek için ise alçaltıcı modda çalışan çeviricideki iki senkron anahtarın birleşim noktasında (SW1) oluşan 0 ile giriş gerilim değeri arasında değişebilen gerilim kullanılmıştır. Bu değişken gerilim değerinin A, B, C, D, E yolları vasıtasıyla filtrelenip, süzülerek yükseltici kısmındaki bootstrap kapasitörü üzerinde sabit bir gerilim değeri elde edilmesi hedeflenmiştir. Bu sayede C_3 kapasitörü sürekli şarjda tutulacağı için alt kısımda bulunan anahtarın belirli periyot aralıklarında iletime girip kapasitörün şarj edilmesine ihtiyaç duyulmaz. Tasarlanan devre simetrik yapıda olduğu için aynı durum çevirici yükseltici modda çalıştığında alçaltıcı kısım anahtarları için de geçerli olacaktır. Bu sebeple yükseltici mod için analiz yapılmamıştır.



Şekil 7: Anahtar sürücü problemleri için kurulan devre

5. Benzetim ve Uygulama

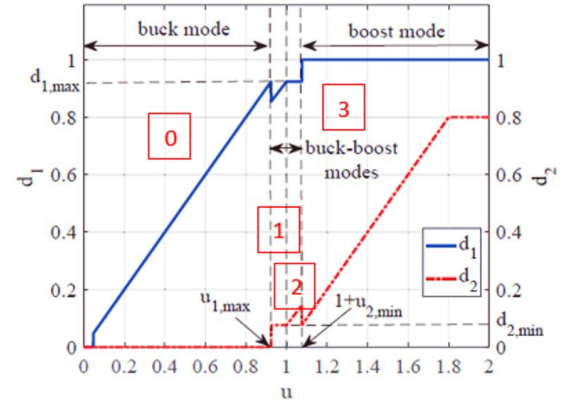
Yumuşak geçiş uygulamalarına geçmeden önce Şekil 3'te verilen ölü bölge doluluk oranı karakteristiği MATLAB/Simulink kullanılarak simülasyon ortamında test edilmiş ve mod değişimleri esnasında çıkış geriliminin davranışı Şekil 8'deki gibi elde edilmiştir. Şekle göre doluluk oranlarındaki ani sıçramalardan kaynaklı çeviricinin mod geçişlerinde kararsız kalarak çıkış geriliminde dalgalanmalar oluşturduğu görülebilir. Ayrıca ölü bölgede (1) çıkış geriliminin giriş gerilimini takip ettiği gözlemlenmiştir.



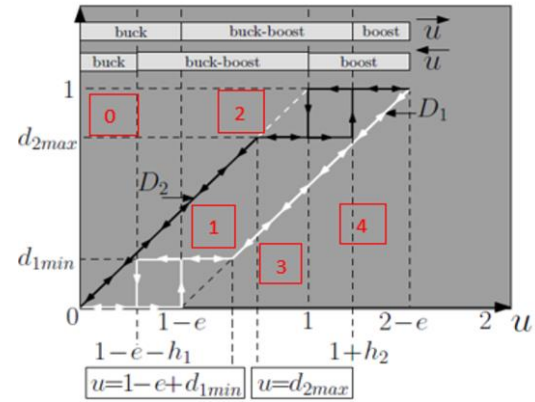
Şekil 8: Ölü bölge analizi simülasyon sonuçları

Yumuşak geçiş yöntemleri için ise Texas Instrument firmasına ait TMS320F28379D işlemcisiyle birlikte MATLAB/Simulink Embedded Coder ara yüzü kullanılarak bu çalışma kapsamında önerilen yöntemle beraber literatürde iyi bilinen (state-of-the-art) yöntemler [8], [9] gerçek zamanlı (external mode) olarak test edilmiş ve karşılaştırılmıştır. Sonuçlar osiloskop ve Simulink üzerinden alınmıştır. Bu çalışma kapsamında [8]'de verilen yöntem Yöntem 1 olarak, [9]'da verilen yöntem ise Yöntem 2 olarak isimlendirilmiştir. Mod geçişlerinin daha kolay anlaşılabilmesi için Yöntem 1 [8] ve Yöntem 2'de [9] verilen doluluk oranı karakteristikleri sırasıyla Şekil 9 ve Şekil 10'da görüldüğü gibi bölgelere ayrılarak numaralandırılmıştır. Bu çalışma kapsamında Şekil 4'te önermiş olduğumuz yöntem ve Şekil 10'daki Yöntem 2'ye göre D_2 alçaltıcı modun, D_1 ise yükseltici modun doluluk

oranını göstermektedir. Yöntem 1'de verilen karakteristikte ise bu durum tam tersidir. Yöntem 1'deki benzetim sonuçlarının diğer yöntemlerle daha rahat karşılaştırılabilmesi için D_2 doluluk oranı alçaltıcı modu, D_1 doluluk oranı ise yükseltici modu gösterecek şekilde kabul edilmiş ve sonuçlar alınmıştır. İncelenen tüm yöntemler için doluluk oranı kısıtlamaları nedeniyle $D_{2,max} = 0,9$, $D_{1,min} = 0,1$ olacak şekilde seçilmiştir.



Şekil 9: Yöntem 1 doluluk oranı karakteristiği [8]



Şekil 10: Yöntem 2 doluluk oranı karakteristiği [9]

Yöntem 1 [8] için kullanılan numaralandırmaların liste gösterimi;

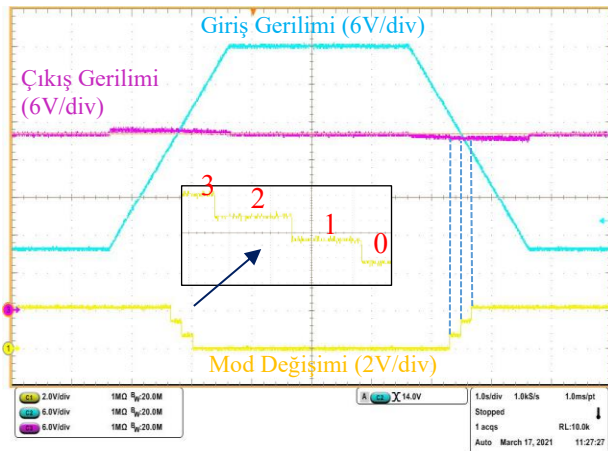
$$M(u) = \begin{cases} 0 < u < u_{1,max}, & 0 \text{ (alçaltıcı)} \\ u_{1,max} \leq u < 1, & 1 \text{ (genişletilmiş alçaltıcı)} \\ 1 \leq u < 1 + u_{2,min}, & 2 \text{ (genişletilmiş yükseltici)} \\ 1 + u_{2,min} \leq u < 2, & 3 \text{ (yükseltici)} \end{cases}$$

Yöntem 2 [9] için kullanılan numaralandırmaların liste gösterimi (u artarken);

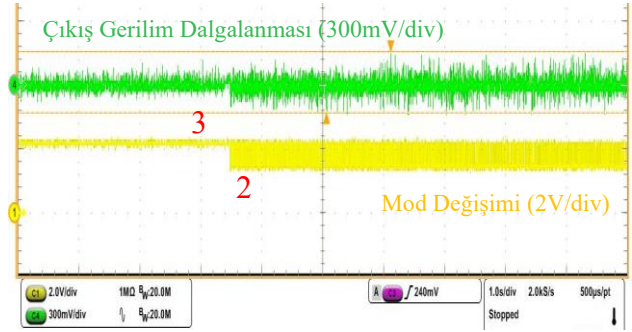
$$M(u) = \begin{cases} 0 < u < 1 - e, & 0 \text{ (alçaltıcı)} \\ 1 - e \leq u < 1 - e + d_{1,min}, & 1 \text{ (alçaltıcı - yükseltici)} \\ 1 - e + d_{1,min} \leq u < d_{2,max}, & 2 \text{ (alçaltıcı - yükseltici)} \\ d_{2,max} \leq u < 1 + h_2, & 3 \text{ (alçaltıcı - yükseltici)} \\ 1 + h_2 \leq u < 2 - e, & 4 \text{ (yükseltici)} \end{cases}$$

Mod değişimlerini gözlemleyebilmek için giriş gerilimi programlanabilir güç kaynağı kullanılarak 10 V'dan 42 V'a 2 saniyede artırılmış, 3 saniye boyunca 42 V'ta sabit tutulmuş ve sonrasında 2 saniye boyunca 42 V'dan 10 V'a kadar azaltılmıştır. Osiloskop üzerinde gerçek zamanlı mod geçişlerinin incelenmesi için ise yazılımda mod değişimi isimli bir değişken tanımlanmıştır. Bu değişken işlemcide bulunan DAC bloğu vasıtasıyla dijitalden analoğa çevrilir. Bu analog sinyalin osiloskop üzerinde gerilim karşılığı görüntülenir ve mod geçişleri kolayca izlenebilir.

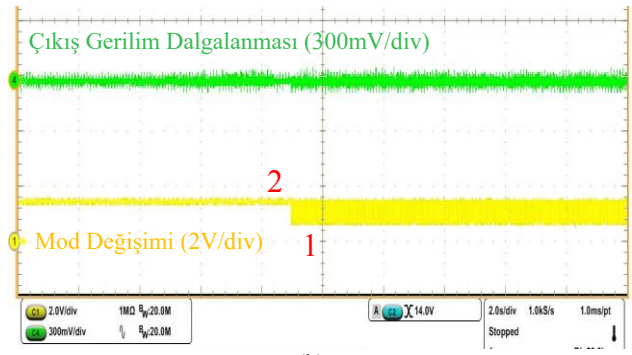
Şekil 11'de Yöntem 1 uygulaması için mod değişimleri esnasında çıkış ve giriş gerilim dalga şekilleri verilmiştir. Şekil 9'da verilen Yöntem 1'in doluluk oranı karakteristiğine göre doluluk oranları birbirlerinin etkilerini kompanse edecek şekilde ayarlandığı için çıkış geriliminde DA (doğru akım) incelemede bariz dalgalanma ve aşım (overshoot) görülmemiştir. Bu sonuca göre ilk başta çeviricinin yumuşak geçişi düzgün yaptığı söylenebilir. Fakat giriş gerilimi manuel olarak yavaş bir şekilde artırıldığında AA (alternatif akım) incelemede 3-2 ile 2-1 mod geçişlerinde kontrolcünün bölgeler arası formül farklılıklarından dolayı kararsız kaldığı ve histerezis yapıları bulunmadığı için sürekli olarak modunu değiştirdiğı bunun sonucunda da çıkış gerilim dalgalanma (ripple) değerlerinin arttığı Şekil 12(a) ve 12(b)'ye bakılarak görülebilir. Söz konusu bu durum 1-0 geçişindeki her iki moddaki farklı formül karakteristiğinden dolayı gözlemlenmemiştir. Bir nevi doğal histerezis oluşmuştur. Ancak bu mod geçişinde kontrolcü sinyali (u), yüksek oranda yeni bir değere sıçrama yaptığı için AA incelemede çıkış geriliminin aşım yaptığı Şekil 12(c)'de görülebilir. Anahtar dalga şekillerinin mod değişimi esnasındaki dalga şekilleri Şekil 13'te verilmiştir. 3-2 mod değişiminde Q1 ve Q3 anahtarlarında bozulmaların ve darbe atlamaların oluştuğu durum Şekil 13(a)'ya bakılarak anlaşılabilir. 2-1 ve 1-0 mod geçişlerinde ise bu durumun gözlemlenmediğı ve anahtarlamaların düzgün olduğu Şekil 13(b) ve 13(c)'ye bakılarak görülebilir. Yine aynı şekilde mod değişimleri esnasında histerezis yapıları bulunmadığı için çeviricinin sürekli olarak modunu değiştirdiğı gözlemlenmiştir.



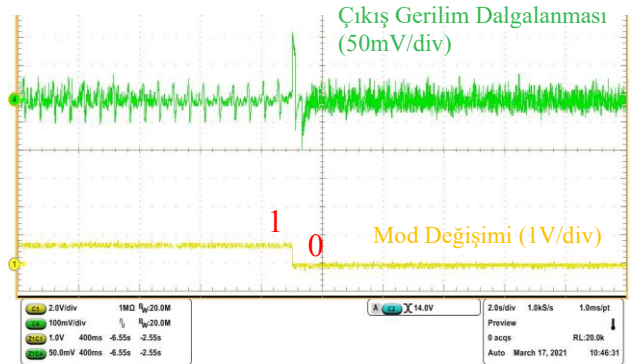
Şekil 11: Yöntem 1, mod geçişlerindeki çıkış gerilimi



(a)

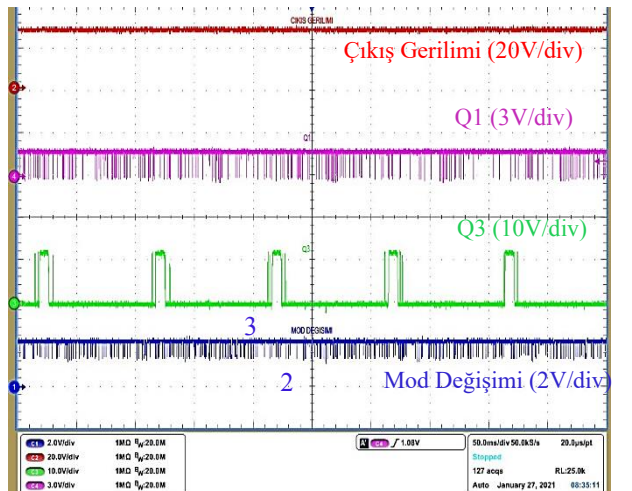


(b)

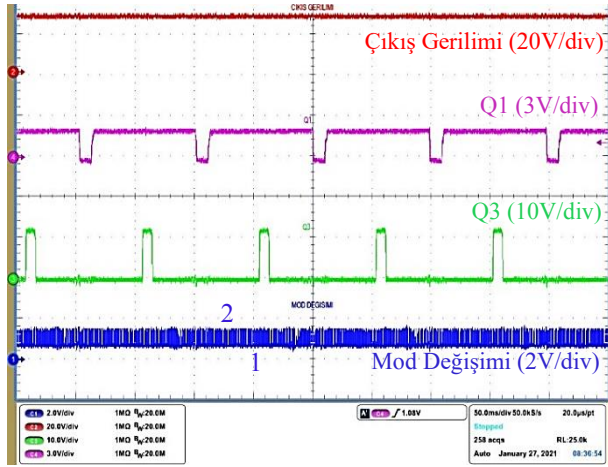


(c)

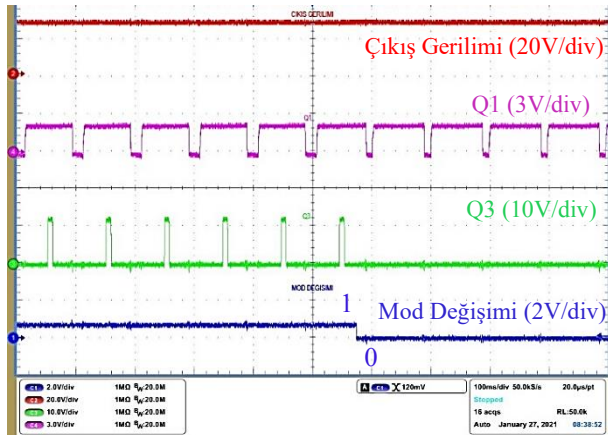
Şekil 12: Yöntem 1, AA incelemede mod geçişleri esnasındaki çıkış gerilimleri a) 3-2 b) 2-1 c) 1-0



(a)



(b)



(c)

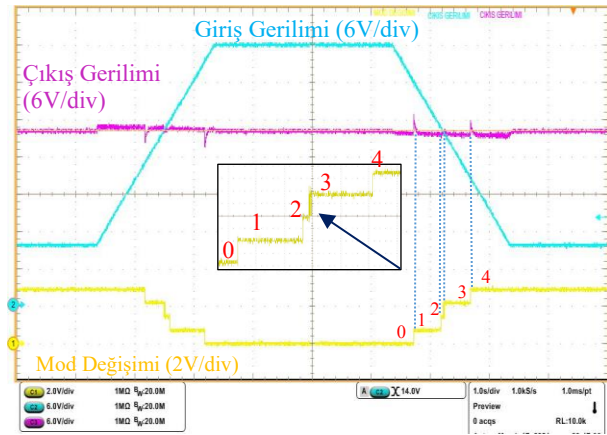
Şekil 13: Yöntem 1, mod geçişlerindeki anahtar durumları
a) 3-2 b) 2-1 c) 1-0

Şekil 14'te Yöntem 2 uygulaması için mod değişimleri esnasında çıkış ve giriş gerilim dalga şekilleri verilmiştir. Şekil 10'de verilen Yöntem 2'nin doluluk oranı karakteristik grafiğine göre doluluk oranlarının birbirlerinin etkilerini kompanse edecek şekilde ayarlanmadığı görülebilir. Bu sebeple 4-3 ve 1-0 mod geçişleri esnasında çeviricinin çıkış geriliminde tepe-tepe arasında yaklaşık 3V'luk anlık istenmeyen aşımalar yaptığı Şekil 14(a) ve 14(b)'ye bakıldığında görülür. Ayrıca Şekil 15(a) ve 15(d)'de bu sıçramaların etkisinden dolayı AA incelemede çıkış gerilim dalgalanmasının geçiş esnasında anlık olarak yükseldiği fark edilmiştir. Bu sebeple Yöntem 2 tam manasıyla yumuşak mod geçişi sağlayamamaktadır. Fakat yine de mod geçişleri esnasında histerezis yapısı kullanıldığı için 4-3 ve 1-0 geçişlerinde kontrolcü sinyali (u) kararsızlıklarından kaynaklı oluşabilecek sürekli mod değiştirme problemleri bu iki bölge geçişinde çözülmüştür denilebilir.

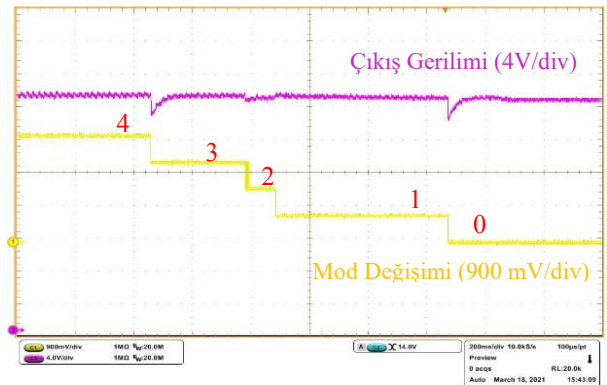
3-2-1 geçişlerinde çeviricinin alçaltıcı-yükseltici modda çalıştığı ve doluluk oranı karakteristik grafiğine göre (Şekil 10) sadece formül yapılarının değiştiği sonucuna varılır. Bu bölgelerde dört anahtarlı anahtarlama yapar. 3-2-1 geçişlerinde doluluk oranı değerlerinin (D_1, D_2) yapıları, formülleri değiştiği için Şekil 10'a göre $u = d_{2max}$ ve $u = 1 - e + d_{1min}$ noktaları etrafında oluşabilecek kontrolcü sinyali (u)

kararsızlıklarından kaynaklı çevirici modunu değiştirebilir. 3-2 geçişinde oluşan bu durum Şekil 15(b)'de görülebilir. Aynı durumun 2-1 geçişinde görülmesi de beklenmektedir fakat bu geçişte formül farklarından kaynaklı olarak doğal bir histerezis yapısı oluşmaktadır. Bu sebeple 2-1 geçişinde sürekli mod değişiminin gerçekleşmediği Şekil 15(c) incelendiğinde görülebilir. Oluşan bu doğal histerezis yapısı, kontrolcü sinyalinin (u) yatay ekseninde anlık bir sıçrama yapmasından kaynaklanmaktadır. Başta iyi gibi gözükse de bu doğal histerezis yapısı kontrolcü sinyalindeki ani sıçramadan dolayı AA incelemede çıkış geriliminde Şekil 15(c)'de ve DA incelemede Şekil 14(b)'de görüldüğü gibi anlık istenmeyen aşımaların ve dalgalanmaların oluşmasına neden olur.

Bu yöntemde anahtarlarda darbe atlama ve kararsızlık durumları gözlemlenmemiştir. 3-2 mod geçişi esnasında oluşan kontrolcü kararsızlığı sonucundaki mod değişiminin anahtarlama yapılarına yansımadağı ve anahtarların Şekil 13(b) ve (c)'dekine benzer düzgün bir şekilde anahtarlama yaptığı sonucuna ulaşılmıştır. Bu neden anahtar dalga şekilleri burada tekrar verilmemiştir.

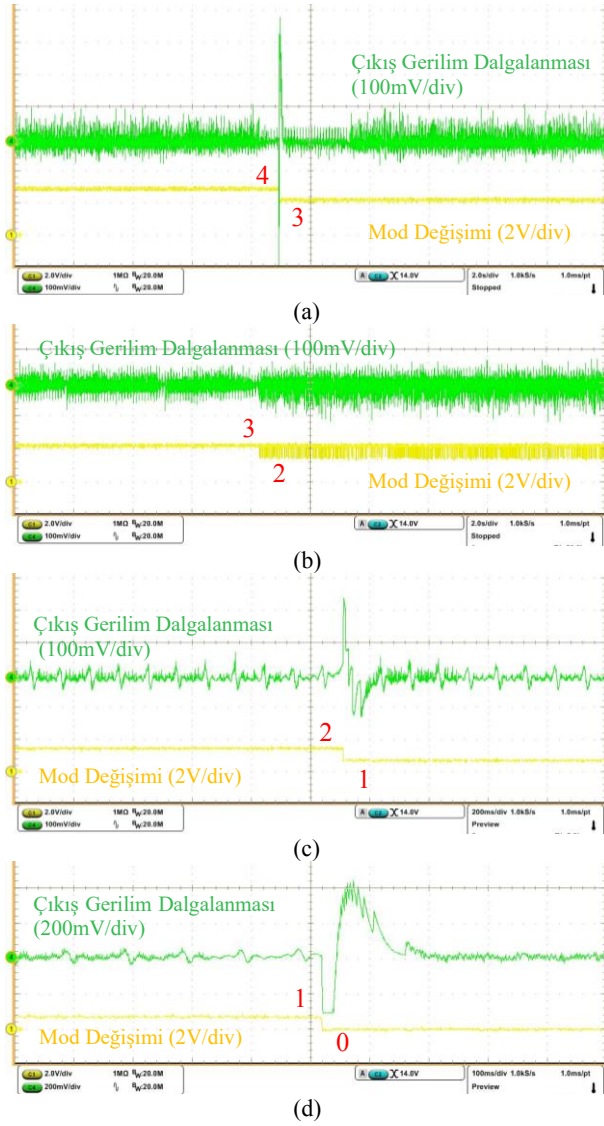


(a)



(b)

Şekil 14: Yöntem 2, a) mod geçişlerindeki çıkış gerilim grafiği b) yakınlaştırılmış görünüm



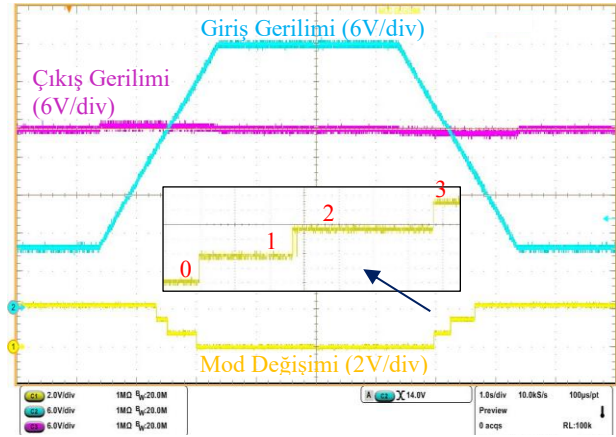
Şekil 15: Yöntem 2, AA incelemede mod geçişleri esnasındaki çıkış gerilimleri a) 4-3 b) 3-2 c) 2-1 d) 1-0

Bu çalışma kapsamında Önerilen Yöntemin mod geçişleri esnasında çıkış gerilimine olan etkisi Şekil 16'da verilmiştir. Doluluk oranları karakteristikleri Şekil 4'te verildiği gibi sıçramaların etkilerini kompanse edecek şekilde tasarlandığı için çıkış geriliminde gözle görülür osilasyon ve anlık istenmeyen aşımalar gözlemlenmemiştir. Çünkü doluluk oranı değerleri (D_1, D_2) birbirlerinin negatif etkilerini minimuma indirecek şekilde ayarlanmıştır. Bunun yanı sıra mod geçişlerinde histerezis yapıları kullanıldığı için mod geçişi esnasında kontrolcüde yaşanacak kontrol döngüsü gecikmeleri, doluluk oranlarının tam olarak birbirine kompanse edememesi gibi durumlardan kaynaklı oluşan kararsızlıklardan kaçınılarak çeviricinin sürekli olarak modunu değiştirmesi sorunu çözülmüştür.

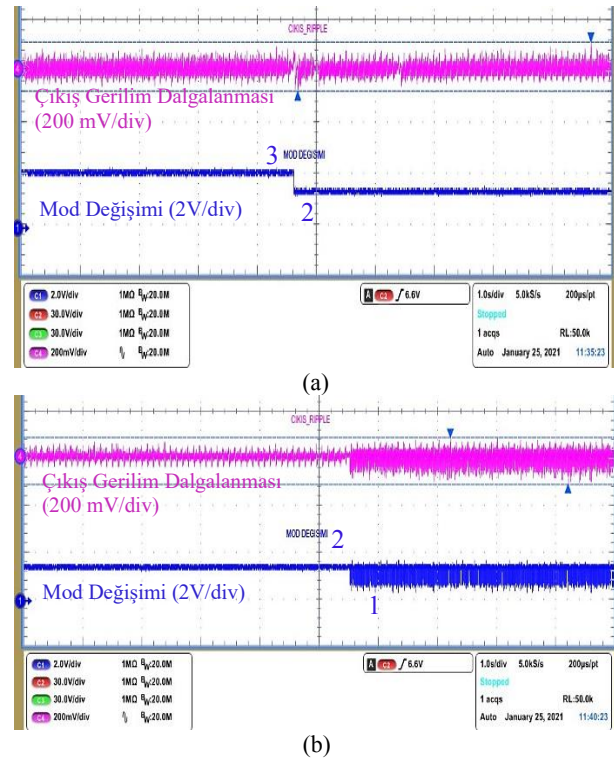
Şekil 17'de mod değişimleri sonucunda AA incelemede çıkış gerilim dalgalanma grafikleri verilmiştir. 3-2 ve 1-0 mod geçişlerinde çıkışta bariz gerilim dalgalanması görülmemiştir. 2-1 geçişinde ise mod değiştirme kararsızlığından dolayı çıkış gerilim dalgalanmasının (ripple) arttığı Şekil 17(b)'ye bakıldığında görülebilir. Bu, önermiş olduğumuz yöntemin tek

dezavantajıdır. Bu olumsuzlukla Yöntem 1 ve Yöntem 2'de birden fazla noktada karşılaşılmaktadır. Önermiş olduğumuz bu yöntemde ise sadece 2-1 mod geçişi esnasında karşılaşılmıştır. Şekil 4'te 2-1 geçişinde temel rol oynayan $u = 1$ noktasında histerezis yapısı bulunmadığı için kontrolcü sinyali (u) bahsedilen nedenlerden dolayı kararsızlıkta kalarak çeviricinin sürekli olarak modunu değiştirmesine sebep olur. Bunun sonucunda da 2-1 geçişinde AA incelemede çıkış dalgalanma geriliminin arttığı görülür. Bu sorunun çözümü ilgili nokta etrafına histerezis yapısının yerleştirilmesi olabilir. Fakat bu çalışma kapsamında bu noktadaki sorunun çözümü incelenmemiştir.

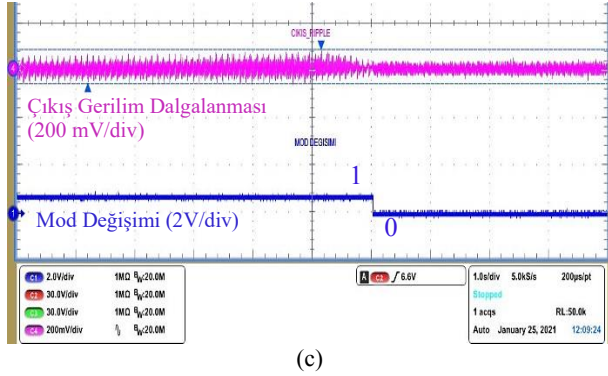
Önermiş olduğumuz bu yöntemde de anahtarlar darbe atlamaları görülmemiştir ve anahtarların Şekil 13(b) ve (c)'dekine benzer düzgün bir şekilde yaptığı görülmüştür. Bu nedenle anahtar dalga şekilleri burada tekrar verilmemiştir.



Şekil 16: Önerilen Yöntem, mod geçişlerindeki çıkış gerilimi



(b)

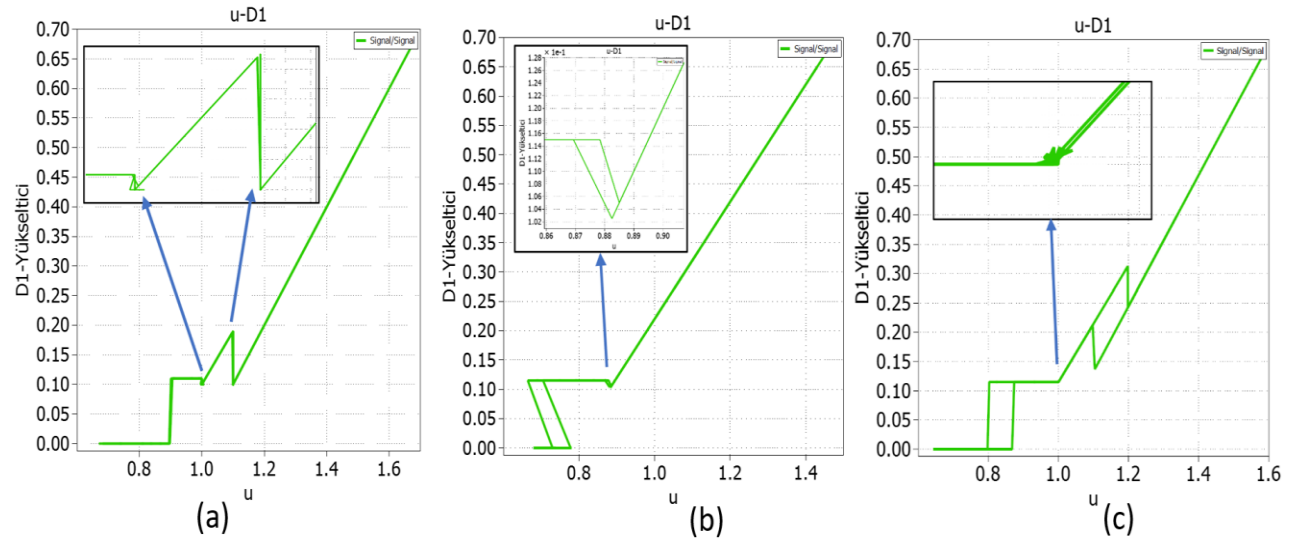


(c)

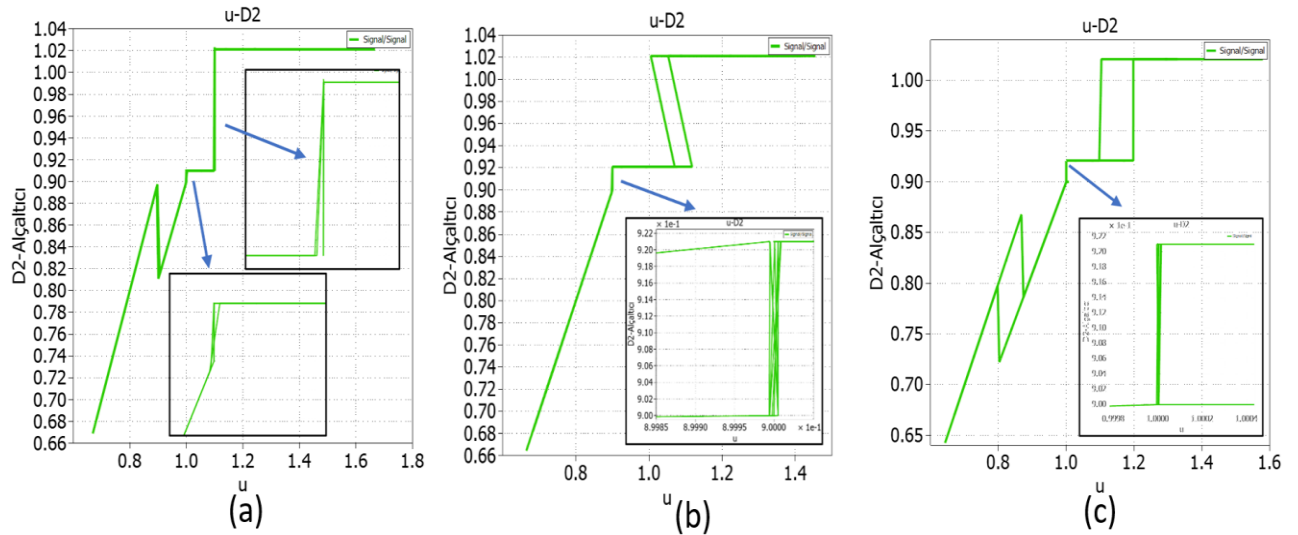
Şekil 17: Önerilen Yöntem, AA incelemede mod geçişleri esnasındaki çıkış gerilimleri a) 3-2 b) 2-1 c) 1-0

Gerçek zamanlı olarak uygulama aşamasında Yöntem 1, Yöntem 2 ve Önerilen Yöntem için elde edilen $u-D_1$, $u-D_2$ ve Kazanç- u dalga şekilleri sırasıyla Şekil 18, 19 ve 20'de verilmiştir. Ani sıçrama ve formül değişim noktalarında çeviricinin sürekli modunu değiştirme ve kararsızlık durumu doluluk oranı ve kazanç grafiklerine bakıldığında da gözlemlenebilir. Problem yaşanan noktaların yakınlaştırılması görüntüleri şekiller içerisinde ok çıkarılarak gösterilmiştir.

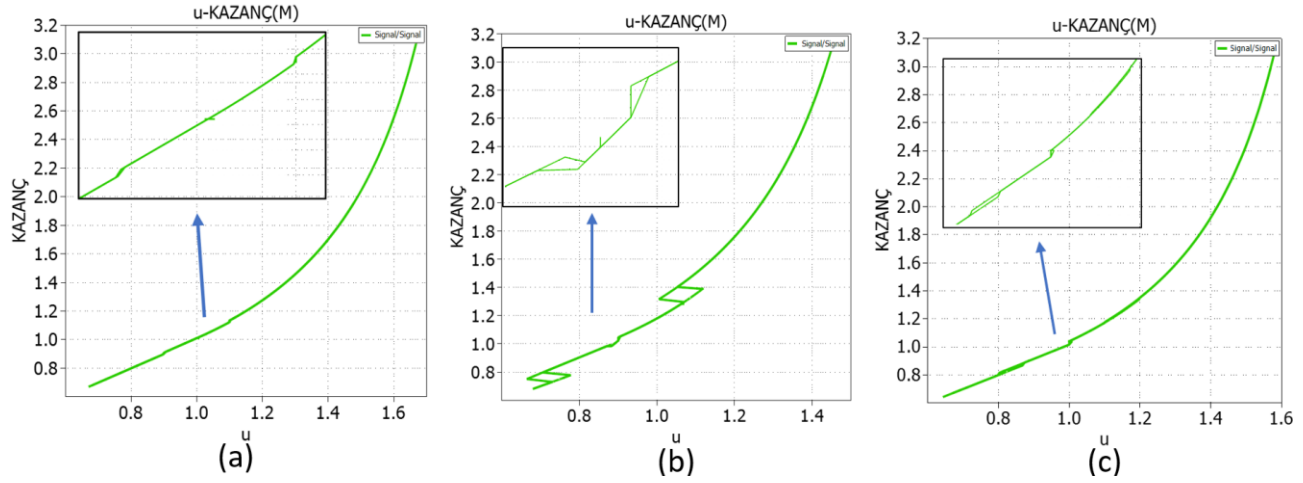
Tablo-2'de ise Yöntem 1, Yöntem 2 ve Önerilen Yöntemdeki mod geçişleri sonucunda elde edilen tepeden tepeye AA gerilim dalgalanması (ripple, V_{p-p}), DA incelemedeki aşım değerleri ($V_{aşım}$), mod değişiminin düzgün yapılıp yapılmadığı ve anahtarların düzgün çalışıp çalışmadığı gibi bilgiler özetlenmiştir.



Şekil 18: Gerçek zamanlı elde edilen $u-D_1$ grafikleri a) Yöntem 1 b) Yöntem 2 c) Önerilen Yöntem



Şekil 19: Gerçek zamanlı elde edilen $u-D_2$ grafikleri a) Yöntem 1 b) Yöntem 2 c) Önerilen Yöntem



Şekil 20: Gerçek zamanlı elde edilen Kazanç-u grafikleri a) Yöntem 1 b) Yöntem 2 c) Önerilen Yöntem

Tablo 2: Yöntemlerin Karşılaştırılması

Yöntemler / Mod Geçişleri	4-3	3-2	2-1	1-0
Yöntem 1	-	* $V_{p-p} \cong 310$ mV * $V_{aşım} \cong 0,2$ V *Mod kararsızlığı var. *Anahtarlamalarda darbe atlamaları mevcut.	* $V_{p-p} \cong 135$ mV * $V_{aşım} \cong 0,2$ V *Mod kararsızlığı var. *Düzensiz anahtarlama.	* $V_{p-p} \cong 215$ mV * $V_{aşım} \cong 0,2$ V *Mod kararsızlığı yok. *Düzensiz anahtarlama.
Yöntem 2	* $V_{p-p} \cong 800$ mV * $V_{aşım} \cong 3$ V *Mod kararsızlığı yok. *Düzensiz anahtarlama.	* $V_{p-p} \cong 165$ mV * $V_{aşım} \cong 1$ V *Mod kararsızlığı var. *Düzensiz anahtarlama.	* $V_{p-p} \cong 350$ mV * $V_{aşım} \cong 1$ V *Mod kararsızlığı yok. *Düzensiz anahtarlama.	* $V_{p-p} \cong 720$ mV * $V_{aşım} \cong 3$ V *Mod kararsızlığı yok. *Düzensiz anahtarlama.
Yöntem 3 (Önerilen)	-	* $V_{p-p} \cong 125$ mV * $V_{aşım} \cong 0,2$ V *Mod kararsızlığı yok. *Düzensiz anahtarlama.	* $V_{p-p} \cong 135$ mV * $V_{aşım} \cong 0,2$ V *Mod kararsızlığı var. *Düzensiz anahtarlama.	* $V_{p-p} \cong 85$ mV * $V_{aşım} \cong 0,2$ V *Mod kararsızlığı yok. *Düzensiz anahtarlama.

Yöntem 1'in [7] Sonuçlarının Yorumlanması:

Şekil 18(a)'ya bakıldığında Yöntem 1'deki D_1 doluluk oranı değerinin doluluk oranı kısıtlamalarından kaynaklı ani sıçrama yaptığı noktada Şekil 19(a)'da verile D_2 doluluk oranı değerinin bu sıçramanın çeviriciye olan etkisini minimuma indirmek amacıyla azaltılmıştır. Bu durumun diğer sıçrama noktasında da gerçekleştirildiği görülmektedir. Doluluk oranları birbirlerinin olumsuz etkilerini azaltacak şekilde ayarlandığı için Şekil 20(a)'da kazanç- u grafiğinin olabildiğince parabolik, ideal duruma yakın bir eğimle arttığı gözlemlenebilir. Fakat doluluk oranı ve formül geçiş noktalarında histerezis yapıları bulunmadığı için 3-2 ve 2-1 geçişlerinde Tablo-2'deki sonuçlara bakıldığında mod kararsızlıklarının olduğu görülebilir. Bunun sonucunda AA incelemede dalgalanma değerlerinin yükseldiği sonucuna ulaşılır. Buna ek olarak 3-2 mod geçişinde anahtarlar darbe atlamaları gözlemlenmiştir. 1-0 geçişinde de histerezis yapısı bulunmamaktadır. Mod değişimi esnasında kararsızlık oluşması beklenirken bu durumun elde edilen sonuçlara göre gerçekleşmediği gözlemlenmiştir. Bunun sebebi ise önceki sayfalarda anlatıldığı gibi bu geçiş esnasında doğal histerezisin oluşmasıdır. Doluluk oranlarının maksimum ve minimum değerleri değiştirildiğinde sadece bu değerlere özgü doğal histerezis durumu ortadan kalkacağı için 2-1 geçişinde de mod

kararsızlıkları görülür. Bu sebeple 3-2, 2-1, 1-0 mod geçişlerinde potansiyel mod kararsızlığı problemleri mevcuttur ve çözülmesi gerekir. Son olarak doluluk oranı değerleri birbirlerini kompanze ettiği için DA incelemedeki aşım gerilim değerleri düşüktür.

Yöntem 2'nin [8] Sonuçlarının Yorumlanması:

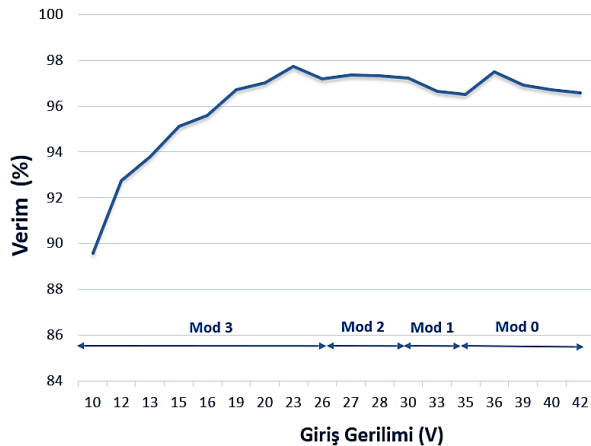
Bu yöntemde ani sıçrama yapılan noktalarda D_1 ve D_2 doluluk oranlarının bu sıçramaların çeviriciye olan olumsuz etkilerini minimuma indirmek için birbirlerini kompanze edecek şekilde ayarlanmadığı Şekil 18(b) ve Şekil 19(b)'ye bakıldığında görülebilir. Bunun sonucunda Şekil 20(b)'deki kazanç- u grafiğinde yüksek genlikli sıçramalar görülür. Grafik ideal beklenen parabolik eğriden uzaklaşır. 4-3 ve 1-0 geçişlerinde histerezis yapıları bulunduğu için Tablo-2'de verildiği gibi o bölgelerde mod kararsızlığı söz konusu değildir. Fakat doluluk oranları birbirlerinin etkilerini kompanze edecek şekilde ayarlanmadığı için aşım gerilim ve gerilim dalgalanması değerlerinin oldukça yüksek olduğu görülmektedir. 3-2 mod geçişinde ise histerezis yapısı bulunmadığı için mod kararsızlığı mevcuttur. Aynı durumun 2-1 geçişinde de olması beklenirken bu durumun gerçekleşmediği gözlemlenmiştir. Bunun sebebi Yöntem 1'in sonuçları kısmında da bahsedildiği gibi 2-1 geçişinde doğal histerezisin oluşmasıdır.

Farklı minimum, maksimum doluluk oranı ve histerezis pencere genişliği değerleri için bu doğal histerezis durumu ortadan kalkacak ve mod kararsızlıkları oluşacaktır. Bu sebeple 3-2 ve 2-1 geçişlerinde potansiyel mod kararsızlığı problemi mevcuttur ve çözülmesi gerekir.

Yöntem 3 (Önerilen Yöntem) Sonuçlarının Yorumlanması:

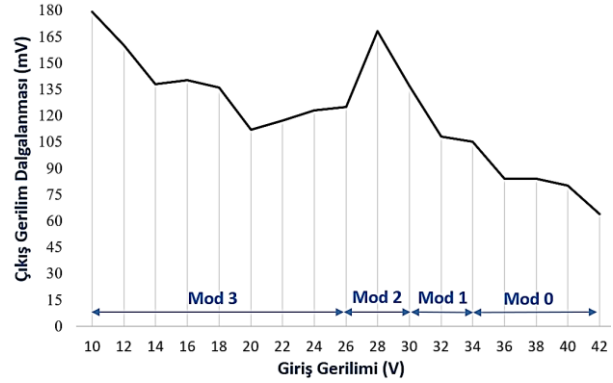
Şekil 18(c) ve 19(c)'de gerçek zamanlı elde edilen sonuçlara göre doluluk oranı değerlerinin (D_1 , D_2) kısıtlamalardan dolayı oluşan ani sıçramalar sonucunda çeviriciye olan olumsuz etkilerini minimize etmek için birbirlerini kompanze edecek şekilde ayarlandıkları görülebilir. Bu sebeple Şekil 20(c)'deki kazanç grafiğinin incelendiğinde grafiğin olabildiğince ideal duruma yakın olduğu ve düzgün bir parabolik eğri ile arttığı söylenebilir. Buna ek olarak Tablo-2'ye göre de DA incelemede aşım gerilim değerlerinin düşük olduğu görülür. Ayrıca 3-2 ve 1-0 mod geçişlerinde histerezis yapıları kullanıldığı için mod geçişlerinde kararsızlık görülmediği ve bu geçişlerde AA incelemede çıkış gerilim dalgalanma değerlerinin düşük olduğu söylenebilir. Önermiş olduğumuz yöntemin tek dezavantajı ise Şekil 4'te önerilen doluluk oranı karakteristik grafiğinde $u = 1$ mod değişim noktasında histerezisin bulunmamasıdır. Bu nokta etrafında D_1 ve D_2 doluluk oranlarının formülleri değiştiği için kontrolcü sinyalinde (u) kararsızlıklar oluşur. Bunun sonucunda çevirici sürekli olarak 2-1 geçişinde modunu değiştirir. Bu durum Şekil 18(c) ve 19(c)'de $u = 1$ noktasına bakıldığında görülebilir. Ayrıca Tablo-2'ye bakıldığında AA incelemede dalgalanma geriliminin 3-2 ve 1-0 geçişlerindeki göre fazla olduğu sonucuna ulaşılabilir.

Ekstra bir çalışma olarak önermiş olduğumuz yöntem için değişken giriş gerilimlerine göre verimlilik sonuçları Şekil 21'de verilmiştir. Şekle göre verimliliğin en düşük olduğu durum giriş gerilim değerinin minimum olduğu yerdir. Bu noktada girişten çekilen akım artacağı için anahtarlar ve bobin üzerindeki akım değerleri artacaktır. Bunun sonucunda anahtarlama ve iletim kayıpları artacak ve verimlilik düşecektir. Giriş geriliminin 20-42 V arasında bulunduğu sürece verimliliğin %96 ile %98 arasında değiştiği gözlemlenmiştir.



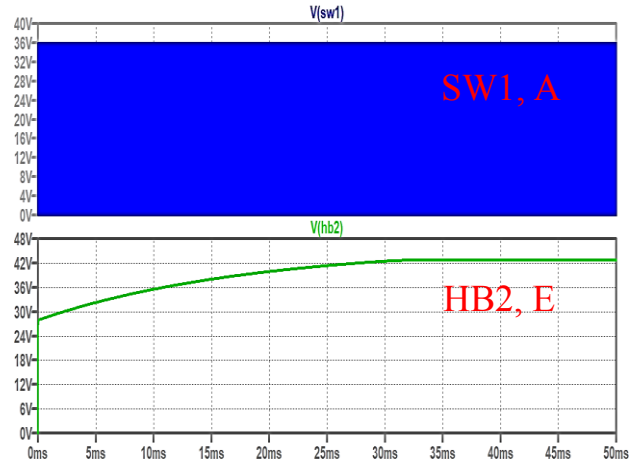
Şekil 21: Önerilen Yöntemdeki Verimlilikler

Şekil 22'de yine önermiş olduğumuz yöntem için değişken giriş gerilimlerine göre AA incelemede çıkış gerilim dalgalanması grafiği verilmiştir. Dalgalanma değerlerinin yükseltici modda daha yüksek olduğu görülebilir. Ayrıca giriş gerilim değeri arttıkça ve alçaltıcı moda yaklaştıkça gerilim dalgalanmasının azaldığı söylenebilir.



Şekil 22: Önerilen Yöntemde AA incelemede çıkış gerilim dalgalanma değerleri

Son olarak ise, Bölüm 4'te detaylı olarak anlatılan bootstrap tabanlı anahtar sürücü entegrelerindeki üst anahtarın %100 açılmama probleminin çözümü için Şekil 5'te tasarlanan devre yapısının benzetim sonuçları Şekil 23'te verilmiştir.



Şekil 23: Anahtar sürücü entegresi için kurulan devre benzetimi

Buna göre alçaltıcı modda çeviricinin üst anahtar ile alt anahtarın birleşim noktası yani anahtarlama noktasında (SW1, A) 0 ile giriş gerilimi değeri arasında değişkenlik gösteren gerilim süzülerek, E noktasında yani yükseltici kısmı bootstrap kapasitörü (C_3) üzerinde ve HB2 noktasında sabit bir gerilim oluşturulmuştur. Bu sayede yükseltici kısmı üst anahtarının (Q4) %100 iletime, alt anahtarın (Q3) ise kesime girmesi sağlanarak bobin üzerindeki enerjinin alçaltıcı kısım anahtarlarına (Q1, Q2) bağlı olarak çıkışa aktarılması sağlanmıştır. Uygulamada aşamasında Şekil 13(c)'ye bakıldığında bu durumun başarıyla gerçekleştiği görülebilir.

6. Sonuçlar

Bu çalışma kapsamında dijital kontrollü dört anahtarlı alçaltıcı-yükseltici çeviricideki doluluk oranı kısıtlamalarından kaynaklı mod geçişlerinde ortaya çıkan problemler ve bunun neticesinde oluşan ölü bölgedeki regülasyon kararsızlıklarından kaçınma yöntemleri incelenmiştir.

Literatürde iyi bilinen (state-of-the-art) iki yönteme göre mod geçişlerinde daha iyi bir performans gösteren yeni bir yumuşak geçiş yöntemi önerilmiş ve analiz edilmiştir.

Elde edilen sonuçlara göre önermiş olduğumuz yöntemin diğer yöntemlere göre daha üstün olduğu görülmüştür. Önermiş olduğumuz yöntem doluluk oranı kısıtlamalarından kaynaklı mod geçişlerinde oluşabilecek kararsızlıkları önleyebilmek adına doluluk oranları birbirlerinin olumsuz etkilerini kompanze edecek şekilde tasarlanmıştır. Ayrıca yine aynı kararsızlıklardan dolayı çeviricinin sürekli mod değiştirmesini engelleyebilmek adına histerezis yapıları kullanılmıştır. Bu sayede mod geçişlerindeki problemler minimuma indirilmiştir.

Ek olarak bootstrap tabanlı senkron anahtar sürücü entegrelerinde üstte bulunan anahtarın iletime girebilmesi için, bootstrap kapasitörünün belirli aralıklarla şarj edilmesi gerekmektedir. Bu şarj döngüsü hem yazılıma ekstra külfet getirir hem de çeviricideki dört anahtarın da aynı anda çalışmasına sebebiyet vereceği için çeviricinin tamamen alçaltıcı veya yükseltici modlarda çalışmasına mâni olur. Tasarlanan düşük maliyetli devre sayesinde bu sorun çözülmüş ve üstteki anahtarın %100 iletimde kalması sağlanmıştır.

7. Kaynakça

- [1] N. Zhang, S. Batternally, K. C. Lim, K. W. See, and F. Han, "Analysis of the non-inverting buck-boost converter with four-mode control method," *Proc. IECON 2017 - 43rd Annu. Conf. IEEE Ind. Electron. Soc.*, vol. 2017-Janua, pp. 876–881, 2017, doi: 10.1109/IECON.2017.8216151.
- [2] L. T. Corporation, "LT8705 – 80VIN and VOUT Synchronous 4-Switch Buck-Boost DC/DC Controller," pp. 1–44.
- [3] Y. J. Lee, A. Khaligh, and A. Emadi, "A compensation technique for smooth transitions in a noninverting buck-boost converter," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 24, no. 4, pp. 1002–1015, 2009, doi: 10.1109/TPEL.2008.2010044.
- [4] M. F. Hung and K. H. Tseng, "Study on the Corresponding Relationship between Dynamics System and System Structural Configurations-Develop a Universal Analysis Method for Eliminating the RHP-Zeros of System," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 65, no. 7, pp. 5774–5784, 2018, doi: 10.1109/TIE.2017.2777386.
- [5] C. Basso, "The Right Half Plane Zero, a Two-Way Control Path," 2008.
- [6] Texas Instruments, "Practical Feedback Loop Analysis for Voltage-Mode Boost Converter," *Appl. Report, SLVA636*, no. January, pp. 1–14, 2014, [Online]. Available: <http://www.ti.com/lit/pdf/slva636>
- [7] R. Zaitu and P. M. P. Ppm, "Voltage Mode Boost Converter Small Signal Control Loop Analysis Using the TPS61030," *Converter*, no. May, pp. 1–21, 2007.
- [8] L. Callegaro, M. Ciobotaru, D. J. Pagano, E. Turano, and J. E. Fletcher, "A Simple Smooth Transition Technique for the Noninverting Buck-Boost Converter," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 33, no. 6, pp. 4906–4915, 2018, doi: 10.1109/TPEL.2017.2731974.
- [9] C. Restrepo, T. Konjedic, J. Calvente, and R. Giral, "Hysteretic transition method for avoiding the dead-zone effect and subharmonics in a noninverting buck-boost converter," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 30, no. 6, pp. 3418–3430, 2015, doi: 10.1109/TPEL.2014.2333736.
- [10] R. Paul and D. Maksimovic, "Smooth transition and ripple reduction in 4-switch non-inverting buck-boost power converter for WCDMA RF power amplifier," *Proc. - IEEE Int. Symp. Circuits Syst.*, pp. 3266–3269, 2008, doi: 10.1109/ISCAS.2008.4542155.
- [11] M. Gaboriault and A. Notman, "A high efficiency, non-inverting, buck-boost DC-DC converter," *Conf. Proc. - IEEE Appl. Power Electron. Conf. Expo. - APEC*, vol. 3, no. C, pp. 1411–1415, 2004, doi: 10.1109/apec.2004.1296049.
- [12] X. Ren, X. Ruan, H. Qian, M. Li, and Q. Chen, "Three-mode dual frequency two-edge modulation scheme for four-switch buck-boost converter," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 24, no. 2, pp. 499–509, 2009, doi: 10.1109/TPEL.2008.2005578.
- [13] P. C. Huang, W. Q. Wu, H. H. Ho, and K. H. Chen, "High efficiency and smooth transition buck-boost converter for extending battery life in portable devices," *2009 IEEE Energy Convers. Congr. Expo. ECCE 2009*, vol. 2, no. 2, pp. 2869–2872, 2009, doi: 10.1109/ECCE.2009.5316448.
- [14] Y.-J. Lee, A. Khaligh, A. Chakraborty, and A. Emadi, "Digital combination of buck and boost converters to control a positive buckboost converter and improve the output transients," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 24, no. 5, pp. 1267–1279, May. 2009.
- [15] P.-C. Huang, W.-Q. Wu, H.-H. Ho, and K.-H. Chen, "Hybrid buck-boost feedforward and reduced average inductor current techniques in fast line transient and high-efficiency buck-boost converter," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 25, no. 3, pp. 719–730, Mar. 2010.
- [16] C. L. Wei, C. H. Chen, K. C. Wu, and I. T. Ko, "Design of an average-current-mode noninverting buck-boost DC-DC converter with reduced switching and conduction losses," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 27, no. 12, pp. 4934–4943, 2012, doi: 10.1109/TPEL.2012.2193144.
- [17] R. Paul and D. Maksimovic, "Analysis of PWM nonlinearity in non-inverting buck-boost power converters," *PESC Rec. - IEEE Annu. Power Electron. Spec. Conf.*, vol. 3, pp. 3741–3747, 2008, doi: 10.1109/PESC.2008.4592538.
- [18] Y. M. Chen, Y. L. Chen, and C. W. Chen, "Progressive smooth transition for four-switch buck-boost converter in photovoltaic applications," in *Proc. 3rd IEEE Energy Conversion Congr. and Expo.*, Phoenix, AZ, 2011, pp. 3620–3625.
- [19] Y. Lee, S. Member, A. Khaligh, and A. Chakraborty, "Digital Combination of Buck and Boost Converters to Control a Positive Buck – Boost Converter and Improve the Output Transients," vol. 24, no. 5, pp. 1267–1279, 2009.
- [20] R. K. Hester, C. Thornton, S. Dhople, Z. Zhao, N. Sridhar, and D. Freeman, "High efficiency wide load range buck/boost/bridge photovoltaic microconverter," *Conf. Proc. - IEEE Appl. Power Electron. Conf. Expo. - APEC*, pp. 309–313, 2011, doi: 10.1109/APEC.2011.5744613.
- [21] B. Sun, "Multimode control for a four-switch buck-boost converter," *Analog Des. J. Power*, pp. 1–6, 2019, [Online]. Available: http://www.ti.com/lit/an/slyt765/slyt765.pdf?utm_content=app-hvp-hpc-null-ns-adj-slyt765-wwe&DCMP=mytinwsltr_03_25_2019&userInfo=tFQTEKqNRksdh6X0oJ1E/dw5n8K28TMs9GiCbiBXHHw=&article_name=app_hvp_hpc_adj_multimodebuck&newsletter=24-MAR-19&eloquaCampaignId.
- [22] T. Ucc and M. Plateau, "UCC2721x 120-V Boot, 4-A Peak, High-Frequency High-Side and Low-Side Driver PACKAGE," 2017.

Burak ÇAYKENARI



Burak ÇAYKENARI, 1994 Çankırı doğumludur. Lisans derecesini 2017 yılında Dokuz Eylül Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümünden almıştır. 2018 yılında Gazi Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümünde yüksek lisans çalışmalarına başlamıştır. Halen ASELSAN A.Ş.'de analog tasarım mühendisi olarak çalışmaktadır.

Doç. Dr. Bünyamin TAMYÜREK



Doç. Dr. Bünyamin TAMYÜREK, 1970 Artvin-Yusufeli doğumludur. Lisans derecesini 1991 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi elektrik mühendisliği bölümünden, yüksek lisans ve doktora derecelerini 1996 ve 2001 yıllarında New York eyaletinin Troy şehrinde yer alan Rensselaer Polytechnic Institute mühendislik okulunun elektrik güç mühendisliği bölümünden almıştır. Dr. Tamyürek, Amerika Birleşik Devletlerinin Ohio eyaletine bağlı Columbus şehrinde, enerji üretim, iletim ve dağıtımını yapan American Electric Power (AEP) isimli kuruluşta iki yıl süreyle yenilenebilir enerji kaynakları ve enerji depolama sistemleri konusunda araştırma ve geliştirme mühendisi olarak görev almıştır. Türkiye dönüşünden sonra 2004-2019 yılları arasında Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümünde çalışmıştır. 2019 yılından itibaren de Gazi Üniversitesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümünde öğretim üyesi olarak çalışmaktadır. Güç elektroniği, kesintisiz güç kaynakları, elektrikli araçlarda elektrikli tahrik ve batarya şarj sistemleri, raylı sistemler, enerji depolama sistemleri, akıllı şebekeler ve askeri ve endüstriyel uygulama alanlarında enerji verimliliği yüksek güç dönüştürücü tasarımı konularında çalışmalar yapmaktadır.

Mobil Sağlık Uygulamalarına Genel Bir Bakış ve Özgün Bir Mobil Sağlık Uygulaması Geliştirilmesi

An Overview of Mobile Health Applications and Development of an Original Mobile Health Application

Mustafa Değerli



Enformatik Enstitüsü
Orta Doğu Teknik Üniversitesi
mustafa.degerli@odtu.edu.tr

Özet

Hem mobil uygulama teknolojilerinde ortaya çıkan modern gelişmeler hem de sağlık konusunun daha fazla önem kazanması ile mobil sağlık uygulamaları önemli bir araştırma ve geliştirme alanı statüsü kazanmıştır. Bu makalede, mobil sağlık uygulamaları konusuna genel bir bakış yapılmakta, başarı için önemli hususlar tartışılmakta ve iyileşmeye açık alanlar belirtilmektedir. Ek olarak, mobil sağlık uygulamaları bağlamında öne çıkan birtakım örneklere yer verilmektedir. Bu makalede ayrıca, mobil sağlık uygulamaları alanının mevcut durumu ve geleceğine yönelik bazı tespit ve değerlendirmelere yer verilmektedir. Bunlara ilave olarak, bu makalede, ofis çalışanları (bilgisayar veya masa başında bütün gün görece hareketsiz olarak çalışan altın veya beyaz yakalı çalışanlar) için daha sağlıklı bir çalışmayı desteklemek için tasarlanan HWOW (Ofis Çalışanları için Daha Sağlıklı Çalışma) adlı özgün bir mobil sağlık uygulaması takdim edilmektedir. Dahası, HWOW ile ilgili ne, nasıl ve neden sorularına verilen cevaplar, HWOW'ın geliştirme süreci hakkında bilgiler, asgari uygun ürüne karar vermek için uygulanan anket sonuçları, HWOW'ın benzer birtakım uygulamalardan farklılıkları ve HWOW'ın temel özellikleri konularında kapsamlı bilgiler bu makalede açıklanmaktadır. Bu makalenin mobil sağlık uygulamaları alanı ile ilgilenen uygulama geliştiriciler, politikacılar ve araştırmacılar için yararlı olabileceği düşünülmektedir.

Anahtar kelimeler: Sağlık, m-sağlık, mobil sağlık uygulaması, HWOW, çalışma hayatı, sağlıklı yaşam, sağlık bilimi

Abstract

Owing to the contemporary developments in mobile application technologies and the increasing importance of health, mobile health applications have gained the status of a noteworthy research and development space. This article provides an overview of mobile health applications, discusses fundamental issues for success, and highlights relevant areas for improvement. Moreover, a number of the notable applications in the context of mobile health applications area are provided. This article also includes comments and evaluations regarding the current status and future of mobile health applications. Additionally, in this article, an original mobile health application named HWOW (Healthier Work for Office Workers) designed to support a healthier work for office

workers (gold or white-collar workers who work relatively sedentary all day at a computer or desk) is presented. Besides, all the details are given regarding answers to what, how and why questions about HWOW, information about HWOW's development process, the results of the survey applied to decide on the minimum viable product, HWOW's differences from similar applications, and HWOW's features. It is evaluated that this article might be beneficial for relevant mobile health application developers, policymakers, and researchers. Keywords: Health, m-health, mobile health application, HWOW, work life, healthy living, health informatics

1. Giriş

Dünyada özellikle son dönemde hem sağlık hem de teknoloji alanında yaşanan büyük değişimler ve gelişmeler, tüm sorumlu ve bilinçli paydaşlar tarafından yakından izlenmekte ve takip edilmektedir. Bu değişim ve gelişmelerin oldukça doğal bir sonucu olarak, hem içinde bulunulan zamana hem de geleceğe dair yeni tartışmalar ve arayışlar ortaya çıkmaktadır. Bu bağlamda, sağlığın teknoloji ile ilişkisi ve etkileşimi kuşkusuz özel olarak dikkat çeken bir husustur. Öyle ki, sağlık ve teknoloji alanları birbirini sürekli beslemekte ve geliştirmektedir. Bu bağlamda, teknoloji ve sağlığın kesişiminde karşımıza çıkan elektronik sağlık (e-sağlık) kavramı için oldukça fazla sayıda, neredeyse 50'den fazla, farklı tarif ve tanımlama söz konusudur. Buna karşın, ilgili tanımların çoğunun temel olarak sağlık ve teknoloji olan iki odak bileşeni vurguladığı görülmektedir [1]. Kısaca tanımlamak gerekirse, sağlık için teknolojinin kullanımı, e-sağlık olarak tanımlanabilir. Öte yandan, e-sağlık, entegre sağlık sistemlerinin özellikleri, olanakları ve sonuçları olarak da yorumlanabilir. Özel olarak, bu birleşim (entegre sağlık sistemlerinin özellikleri, olanakları ve sonuçlarının oluşturduğu birleşim), birleşimin tekil unsurlarının toplamından kesinlikle daha fazlasıdır [2]. Bir başka ifade ile e-sağlık, parçaların tek başına ifade ettiği anlamlarının toplamından daha fazlasını ifade eden, bütünlleştirici ve geliştirici bir kavram ve uygulama alanıdır.

Bir diğer taraftan, mobil sağlık (m-sağlık), e-sağlık konseptinin ziyadesiyle önemli bir unsurudur. m-Sağlık temel olarak sağlık hedeflerine ulaşılmasını desteklemek için mobil ve kablosuz teknolojilerin kullanılması ve uygulamasıdır.

Amaca uygun ve sistemli bir şekilde yürütülmesi koşuluyla, m-sağlık, sağlıkla ilgili süreçleri ve sonuçları dikkate değer bir şekilde iyileştirme ve dönüştürme potansiyeline sahiptir [3]. Bu kapsamda, m-sağlık kavramının kalitesi temelde üç ana mekanizma tarafından oluşmaktadır. Bu mekanizmanın unsurları içerik, bağlam ve teknik özelliklerdir [4]. Son zamanlarda yaşanan gelişmelerin beklenen bir sonucu olarak, m-sağlık özellikle akıllı telefonlar ve giyilebilir teknolojiler ile büyük ölçüde iyileşmekte ve pekişmektedir.

Son zamanlarda, m-sağlık teknolojileri sayesinde iyileştirilmiş sonuçlar ve önemli ölçüde azaltılmış masraflarla, sağlık hizmetlerinin pek çok yönünün değiştirilebilir ve iyileştirilebilir olduğu görülmektedir [5]. Örneğin, büyük veri analizi ve makine öğrenmesi, m-Sağlık 2.0 olarak tarif edilen mobil sağlığın yeni perspektifleri ve uygulamaları için gün geçtikçe daha yaygın hâle gelmektedir [6]. Bu perspektifle, nitelikli ve kaliteli teknolojik gelişimler, m-sağlık uygulamaları için oldukça önemli bir avantaj oluşturmaktadır.

Özel olarak bakıldığında, mobil sağlığın, mobil araçların dinamiklerinin sağlıkla ilgili çeşitli amaçlarla kullanılması ile ilgilendiği görülmektedir. Bu durum hem devlet kaynaklarına hem de sosyal ağlara erişimi kapsar. Bu kapsamda, kurumlar, bireyler ve ilgili tarafların kendi içlerinde ve birbirleri ile etkin bir şekilde iletişimleri ve etkileşimleri önemli bir başarı faktörü olarak karşımıza çıkmaktadır [7]. Dolayısıyla, gerçek anlamda bütünleşik bir kurgu ve uygulama, arzu edilen sonuçlara ulaşmak için önemli ve gereklidir. Güncel durumda, en yaygın olandan görece daha az yaygın olana doğru, e-sağlık ve m-sağlık uygulama alanları şu şekilde listelenebilir: Sağlık eğitimleri ve sağlık bilgisi arama, kaydetme / izleme ve tıbbi hizmetler ile hatırlatıcılar ve paylaşım [8]. Bu perspektiften bakıldığında, m-sağlık gerçekten çok boyutlu bir araştırma ve uygulama alanı olarak görülmektedir. Bu geniş yelpazede, mobil sağlık alanındaki paydaşlar için bazı fırsatlar ve zorluklar söz konusudur.

Akıllı telefonların gün geçtikçe daha yaygın olarak benimsenmesi nedeniyle, mobil uygulamalar aracılığıyla sağlık davranışlarını büyük oranda etkilemek için önemli bir fırsat söz konusudur [9]. Buna ek olarak, insan sağlığının ilgili bir parçası olan vücut sensör ağları, insan-makine etkileşimlerini büyük ölçüde değiştirdikleri ve insanların deneyimlerinin mükemmelliğini önemli ölçüde artırdıkları için umut verici olarak görülmektedir [10]. Diğer taraftan, kayda değer bir araştırma, akıllı telefon kullanıcıları bireylerin kendi sağlık bilgilerini takip etme ve izlemede daha istekli olduklarını ve dolayısıyla daha kaliteli bir yaşam için bir adım önde olabileceklerini ortaya koymuştur [11]. Dolayısıyla, mobil cihaz (akıllı telefon) ve uygulama (mobil sağlık uygulamaları) kullanıcılarının sağlık açısından nispeten avantajlı olabileceğini söylemek mümkündür.

Daha uzun ömür her ne kadar ilk bakışta iyi ve olumlu görülse de, yaşlanmaya bağlı hastalıkların doğal bir sonucu olarak, daha uzun ömür, sosyal ve ekonomik olarak özellikle ele alınması gereken bazı hususları ortaya çıkartmaktadır. Daha uzun hayat yaşayacak kişilerin ömürlerinin sonuna doğru özellikle daha aktif ve sağlıklı olmaları iyi bir pratik olarak görülmektedir. Günümüzde bu ihtiyacı desteklemek üzere, mobil sağlık araçlarının ve uygulamalarının yadsınamaz bir rol oynayacağı kabul edilmektedir [12]. Dahası, günümüzde

insanların önemli bir bölümünün akıllı telefon ve mobil uygulama kullanma tutum ve davranışları ortadadır. Buna ilave olarak son zamanlarda önemi daha fazla anlaşılan sağlık kavramının etkin bir şekilde yönetilmesi ihtiyacı mevcuttur. Bu gerçekler dikkate alındığında, mobil sağlık uygulamaları için heyecan verici ve işlevsel bir yakın gelecekte söz etmek mümkündür. Özetle, mobil sağlık uygulamalarının hayatın sağlık sahnesinde uzun ve çok boyutlu olarak sürecek ana oyuncu rolü başlamıştır ve devam etmektedir.

Tüm bu ortaya koyulan bilgi ve gerekçeler ışığında, mobil sağlık uygulamaları konusu, bu konuya ilgili duyan uygulama geliştiriciler, politikacılar ve araştırmacılar açısından kesinlikle dikkate değer, umut vaat eden ve özel bir ilgi ile konsantrasyon gerektiren bir konu ve alan olarak ilgili paydaşların karşısına çıkmaktadır. Bu makale, 14. Ulusal Yazılım Mühendisliği Sempozyumu (UYMS 2020) kapsamında sunulan ve ilgili bildiriler kitabında İngilizce olarak yayımlanan "A Mobile Health Application for Healthy Living: HWOW (Healthier Work for Office Workers)" başlıklı bildirinin [13] önemli ölçüde geliştirilmiş ve genişletilmiş hâlidir. Söz konusu bildirden farklı olarak, bu makalede, mobil sağlık uygulamaları konusuna güncel ve kapsamlı genel bir bakış yapılmış, bu alanda başarı için önemli hususlar tartışılmış, mobil sağlık uygulamaları konusunda özellikle iyileşmeye açık alanlar belirtilmiştir. Bu makalede ek olarak, mobil sağlık uygulamaları bağlamında öne çıkan bazı örnek uygulamalara daha kapsamlı yer verilmiştir. Ayrıca bu makalede, mobil sağlık uygulamaları alanının mevcut durumu ve geleceği hakkında kapsamlı birtakım tespit ve değerlendirmelere de yer verilmiştir. Bu önemli farkları yaratan unsurlar bir bütün olarak değerlendirildiğinde, makalenin hem ilgili literatür hem de alandaki aktörler açısından orijinal katkısının ortaya çıktığı düşünülmektedir.

2. Mobil Sağlık Uygulamaları

Makalenin bölümünde, mobil sağlık uygulamaları alanında öne çıkan çeşitli önemli örneklere yer verilmekte ve bu alanda başarı için kritik faktörler ile mobil sağlık uygulamaları alanında iyileşmeye açık birtakım öğeler açıklanmaktadır.

2.1. Örnekler

Mobil sağlık uygulamaları alanına genel olarak bakıldığında oldukça farklı amaçlar ve kullanım durumları için değişik mobil sağlık uygulamalarının geliştirildiği ve kullanıma sunulduğu görülmektedir. Makalenin bu bölümünde, açık ve erişilebilir literatürde yer alan çeşitli mobil sağlık uygulamaları örneklendirilerek güncel mevcut durum kapsamlı bir biçimde ortaya koyulmaktadır.

Mobil sağlık uygulamalarının önemli kullanım alanlarından biri klinik çalışmalardır. Davranış değişikliği, tedavi uyumu, tanı, hastalık yönetimi ve raporlama amaçları ile kullanılan mobil sağlık uygulamalarının, yaklaşık yüzde yirmisinin klinik çalışmalarda kullanıldığı belirtilmiştir. Bunların ise özellikle kronik hastalıkların yönetilmesi, izlenmesi ve önlenmesinde kullanıldığı görülmektedir [14]. Öte yandan, toplum tarafından yönetilen ve işbirliği ile tasarlanmış m-sağlık uygulamaları da söz konusudur [15]. Toplumun ilgili süreçlere dâhil olduğu bu tür uygulamalar özellikle dikkate değerdir. Ayrıca, bir başka araştırmada, bir dizi kayıp iş günü üretkenliğini önemli oranda azaltan "daha az otur, daha fazla hareket et" sloganına sahip

başarılı bir mobil sağlık uygulaması ortaya koyulmuştur [16]. Bu çalışma özel olarak bir mobil sağlık uygulamasının insan davranışını nasıl değiştirebildiğinin önemli bir örneği olarak görülebilir.

Mobil sağlık uygulamaları ile ilişkili olarak, dünya ölçeğinde dikkate değer olan başka bir önemli çalışma ise Austria Mobile e-Card projesidir. Var olan güvenli kimlik üzerine inşa edilen bu proje, akıllı telefonda elektronik sağlık hizmetinin bir gerçekleştirilmesi olarak görülmektedir. Bu projenin öne çıkan önemli özelliklerinden biri ise projenin Avusturya'nın yasal çerçevesine uyumlu bir mahremiyet ve güvenlik boyutu içermesidir [17]. Proje bu yönü ile özellikle dikkate değerdir. Öte yandan, kanserli hastaların semptom kontrolünün iyileştirilmesinde de mobil sağlık uygulamalarından önemli oranda istifade edilebileceği görülmektedir. Her ne kadar diğer klinik olguların semptom kontrolünde hâlâ iyileşmeye açık olsa da, mobil sağlık uygulamaları en azından kanserli bireylerin semptom kontrolünü iyileştirmede önemli ölçüde işe yarayabilmektedir [18]. Oldukça önemli bir hastalık olan kanserin yönetilmesinde işlevsel olan bu başarılı uygulama da dikkate değer bir başarılı örnek olarak görülmektedir.

Mobil sağlık uygulamaları bağlamında bir başka farklı çalışma ise Vietnam'da zihinsel sıkıntı ve HIV riskinin izlenmesi amacı ile kullanılan bir uygulamadır. İhtiyaç duyulan bilgiyi hızlı ve doğal bir şekilde sağlaması ile, özel kullanıcı gruplarının sağlık açısından hassas bilgileri birbirleri ile paylaşabildiği bu uygulama önemli bir figür olarak görülebilir [19]. Buna ek olarak, hamile kadınlar için de işe yarar mobil sağlık uygulamalarından söz etmek mümkündür. Anne ve bebek sağlığını temin etmek amacı ile kullanılacak mobil sağlık uygulamaları için bir başarılı örnek de SmartMoms Canada isimli uygulamadır. Yapılan ilgili çalışma, bu uygulamanın sağladığı yararlar ve gelecek için potansiyelinin kadınlar tarafından takdir edildiğini göstermektedir [20]. Yine başka bilim insanları [21], giyilebilir bir cihaza dayanan yeni bir düşme tespit sistemi geliştirmişlerdir. Her ne kadar düşme tespit algoritmaları çok yeni olmasa da, araştırmacılar mevcut gerçekten önemli bir ihtiyacı karşılamaya çalışmışlardır.

Bir başka ilginç ve dikkate değer makalede, bir mobil uygulamanın alkol tüketimini izleme ve azaltmada nasıl işe yarayabileceği gösterilmiştir. Özel olarak, Drinkaware isimli bu uygulama da, sağlığı yönetme işlevi dolayısıyla başarılı bir mobil sağlık uygulaması olarak değerlendirilebilir [22]. Diğer taraftan, ileri yaşta insanların bakımı için, hâli hazırda var olan mobil sağlık uygulamalarının içerik ve özelliklerini kıyaslamak ve değerlendirmek üzere yapılan bir araştırmanın sonucunda, Medscape ve Skyscape Medical Library isimli uygulamaların genel ilaç bilgileri, tıbbi referans, klinik puan ve tıbbi hesap makinesi özellikleri açısından öne çıktığı gösterilmiştir. Öte yandan, yine aynı yaş grubu için, Alzheimer's Disease Pocketcard ve Delirium & Dementia isimli uygulamalar da Alzheimer hastaları ile deliryum ve demans hastaları için öne çıkan işlevsel mobil sağlık uygulamaları olarak kayıtlara geçmiştir [23]. Bir başka önemli çalışmada [24], araştırmacılar mobil sağlığa dayalı ve tanı koymadan sorumlu bir bileşen içeren bir çerçeve geliştirmişlerdir. Tekrar kullanılabilirlik ve mevcut birikimi bir derecede derlemesi açısından bu çalışma da anlamlı eforlar arasında yer almaktadır.

Mobil sağlık uygulamalarının oldukça farklı kategorileri vardır. Örneğin, [25] sağlık okuryazarlığını iyileştirmek için bir uygulama geliştirmiş ve mobil uygulamaların yüksek bir kullanıcı erişimi kapsamı elde etmek amacıyla geliştirilmesi gerektiği not etmiştir. Ayrıca, mesela [26] özellikle kullanıcı deneyimine dayalı olarak, hamile ve yürümeye yeni başlayan çocuklar için bir sağlık bakımı uygulaması geliştirmiş ve pilot olarak test etmiştir. Bu kapsamda, kullanılabilirliği, kullanım kolaylığını, öğrenme kolaylığını, memnuniyeti ve kullanılabilirliği başarılı bir şekilde karşılayan bir uygulama geliştirmişlerdir. Diğer araştırmacılar [27] fizyolojik parametrelerin uzaktan izlenmesini amaçlayan bir m-sağlık çözümü ortaya koymuşlar ve hastaneye yatış oranını azaltmayı ve hastanın kendi kendini yönetmede güçlenmesini artırmayı bir mobil sağlık uygulaması ile başarmışlardır. Bu örnekler de mobil sağlık uygulamalarının ne kadar geniş bir yelpazeye yayıldığını göstermesi bakımından dikkate değerdir.

Bir başka önemli analiz [28] sonucunda, çeşitli mobil sağlık uygulamalarının tasarım ve geliştirmelerinde söz konusu efor ve kaynakların sıklıkla gereksizce tekrarlandığı tespit edilmiştir. Bu açıdan, bilhassa benzer yazılım örüntülerinin olduğu fakat tekrar kullanılabilirlik hususunun yeterince dikkate alınmadığı açıkça tespit edilmiştir. Bu gereksiz tekrarı bir seviyede önlemek amacı ile, ilgili çalışmada sağlık profesyonelleri ve araştırmacıların kendi veri yoğun mobil sağlık uygulamalarını geliştirebilecekleri bir çözüm ve alt yapı ortaya konulmuştur. Araştırmacıların ortaya koydukları bu yapı, temelde ilgili kodlama ve programlama işgücü kaybını azaltmayı, hataları en aza indirmeyi ve maliyetleri iyileştirmeyi sağlamaktadır. Sistem ve yazılım mühendisliği için özellikle önemli olan tekrar kullanılabilirlik hususuna dair gerçek bir tahli ortaya koyan bu araştırma da uygulama geliştiriciler için özellikle dikkate değerdir.

Günümüzde, otomobillerde dâhi kişisel sağlık servislerinin geliştirilmesi ve entegrasyonu önemli bir ihtiyaç ve gelişim alanı olarak ortaya çıkmaktadır [29]. Otomobillerin de mobil sağlık uygulaması içermesi ve bu yolla sağlık durumunun izlenmesi dâhil sağlığa ilişkin kullanışlı elementler içermesi değerli görülmektedir. Bu açıdan değerlendirildiğinde, mobil sağlık uygulamalarının otomobillerle birlikte çalışabilirlik ve sağlık için entegre olabilirlik konuları üzerinde daha fazla ve daha dikkatli çalışılması gereken konular olarak görülmelidir.

Her ne kadar etkililikleri ve etkinlikleri daha detaylı ve kapsamlı açıklanmaya ve gösterilmeye muhtaç olsa da, bütün kullanımı ve obezite konuları ile mücadelede için de çeşitli önemli mobil sağlık uygulamalarının geliştirilmiş ve kullanıma sunulmuş olduğu görülmektedir. Günümüzdeki mobil teknolojilerin heyecan veren potansiyelleri ve olanakları düşünüldüğünde, bütün kullanımı ve obezite konuları ile mücadele dâhil bir çok bağlamda mobil sağlık uygulamalarının önemli ölçüde işlevsel ve yararlı olabileceği öngörülmektedir [30]. Gittikçe yaygınlaşan ve genişleyen bir alan olan mobil sağlık uygulamaları alanında farklı önemli örnekler de öne çıkmaktadır. Örneğin, SEAL isimli uygulamada, araştırmacılar [31] destekli yaşam için akıllı çevre sağlamak üzere bir mobil sağlık platformu oluşturulmuştur. Uyumluluk, kullanıcı odaklı tasarım, erişilebilirlik, şeffaflık, emniyet, güvenlik ve mahremiyet boyutları öne çıkan bu uygulama, başarılı ve not edilmeye değer mobil sağlık uygulamaları arasındadır.

Bir başka dikkate değer çalışmada, araştırmacılar mobil sağlık uygulamalarının geliştirilmesi için bir araç geliştirmişlerdir. mHealthDroid isimli Android temelli olan bu araç, açık kaynak yaklaşımını benimseyen bir mobil sağlık uygulama geliştirme aracıdır. Uygulama geliştiriciler sadece bu geliştirme aracını geliştirmekle kalmayıp, bu araç ile örnek bir uygulama da geliştirmişlerdir. Kaynak ve iletişim soyutlama, biyomedikal veri toplama, sağlık bilgisi çıkarma, kalıcı veri depolama, uyarlanabilir görselleştirme, sistem yönetimi, akıllı uyarılar, öneriler ve kılavuzlar sunan bu başarılı örnek, mobil sağlık uygulamalarını Android platformunda geliştirmek isteyenler için işlevsel ve yararlı görülmektedir [32]. Bir diğer makalede [33], sis bilişimi destekli sağlık sisi çerçevesi ele alınmıştır. Araştırmacılar sağlık sisi ismini verdikleri yapıda sis bilişimi destekli olarak mahremiyet ve güvenliği önceleyerek maliyet iyileştirmesi yapmışlardır. Hem mühendislik hem de sosyal açıları başarılı bir şekilde harmanlayan bu uygulamalar ilgi çekmektedir.

Bilinçli olarak oldukça geniş yelpazeden seçilen ve makalenin bu bölümünde örneklendirilen durumlardan net bir şekilde görülebileceği üzere, mobil sağlık uygulamaları ile ilişkili çeşitli olgunluk seviyelerinde çalışmalar bulunmaktadır. Öte yandan, teknoloji ve sağlık alanında meydana gelen gelişmeler ve değişimlere paralel olarak, mobil sağlık uygulamaları alanının daha da genişleyeceğini, gelişeceğini ve nitelikli hâle gelebileceğini belirtmek isabetli olacaktır.

2.2. Başarı Faktörleri ve İyileşmeye Açık Yönler

Fayda potansiyeli oldukça yüksek olan e-sağlık ve dolayısıyla m-sağlık alanları ile bu alanların önemli bir elementi olan mobil sağlık uygulamaları konusu, kuşkusuz bazı kritik başarı faktörleri ve iyileşmeye açık yönler barındırmaktadır. Makalenin bu bölümünde mobil sağlık uygulamalarının başarısını etkileme endeksi yüksek birtakım hususlar ele alınmış ve detaylandırılmıştır.

Doğal olarak, m-sağlık alanı ve uygulamaları ile ilgili birtakım önemli zorluklar vardır. Bu zorluklar temel olarak sürekli izleme, tam katılım, birlikte çalışabilirlik ve etkileşimin nispeten azalması olarak maddeler hâlinde sıralanabilir [34]. Öte yandan, e-sağlık uygulamaları için birlikte çalışabilirlik oldukça önemli olarak görülmektedir [35]. Genel olarak, m-sağlık uygulamaları için başarıya büyük ölçüde hizmet eden beş ana tasarım önerisi, [36] tarafından kestirimci, kişiselleştirilmiş, önleyici, katılımcı ve psiko-bilişsel şeklinde listelenmiştir. Ek olarak, bu bağlamda başarı için, bilim insanları [37] son derece düşük güç tüketimi ile güvenilir sistem çalışması unsurlarının önemini vurgulamaktadırlar.

Mobil sağlık uygulamalarının arzu edilen seviyede başarılı olabilmesi için güvenlik, mahremiyet ve birlikte çalışabilirlik boyutlarının iyi harmanlanması ve yönetilmesi oldukça önemli ve gereklidir. Bu bağlamda, özellikle mahremiyet ile erişilebilirlik, güvenlik ile birlikte çalışabilirlik ve esneklik ile standardizasyon konuları iyi ve kullanıcılar tarafından kabul edilebilir bir şekilde dengelenmelidir [38]. Özel olarak, mobil sağlık uygulamalarının birlikte çalışabilirlik açısından uygun ve olgun bir karakter sergilemesi gereklidir. Sağlıkla ilgili hassas bilgilerin korunması hususu dikkate alındığında da, birlikte çalışabilirlik, güvenlik ve emniyet elementleri, neredeyse kullanılabilirliğin önünde gelmektedir.

Mobil sağlık uygulamalarının ve araçlarının gittikçe daha popüler hâle geldiği son zamanlarda, kullanıcıların kişisel sağlık bilgilerinin toplanması ve kullanılması konusu özellikle tasarımcılar ve uygulama geliştiriciler tarafında gelişmeye açık bir konudur. Bu da kimi zaman maalesef güvenli olmayan uygulamaların yayımlanmasına neden olabilmektedir. Bu kapsamda, özellikle Amerika Birleşik Devletleri ve Avrupa Birliği bağlamında var olan mahremiyet ve güvenlik ile ilgili düzenlemelerin mobil sağlık açısından yorumlanması ve uygulanmasında yaşanan bazı eksiklik ve belirsizliklerin dikkate değer olduğu not edilmiştir [39]. Bu açıdan bakıldığında, mobil sağlık ve ilgili uygulamalar için mahremiyet ve güvenliğinin sağlanması ve iyileştirilmesi üzerinde çalışılması gereken bir konudur.

Bir başka önemli çalışmada, Android uygulama mağazasında yer alan 154 farklı mobil sağlık uygulaması, sağlık verilerinin mahremiyet, güvenlik ve emniyeti açısından değerlendirilmiş ve incelenen çoğu uygulamanın mahremiyet, emniyet ve güvenlik açılarından önemli oranda iyileşmeye açık olduğu belirlenmiştir [40]. Diğer taraftan, güvenilirlik, güvenlik, regülasyon ve entegrasyon hem son kullanıcıların hem de sağlık profesyonellerinin mobil sağlık uygulamaları açısından dikkate almaları gereken hususlar olarak belirlenmiştir [41]. Bu bağlamda, mobil sağlık uygulamalarının düzenlenmesi ve standardize edilmesi için, Xcertia isimli bir çalışma ile ilgili tüm paydaşları bir araya getiren örnek bir yaklaşım ortaya koyulmuştur [42]. Söz konusu uygulamaları mahremiyet, güvenlik, içerik, işletilebilirlik ve kullanılabilirlik boyutları ile dengeli bir şekilde harmanlayabilmek için kılavuzlar geliştirilmiştir. İlgili bilgi birikiminin oluşması ve olumlu yönde ilerlemesi için bu tür çalışmalar önemli ve gerekli olarak görülmektedir.

2020 yılında yoğunluk kazanan ve tüm dünyada etkili olan COVID-19 pandemisi için de mobil sağlık uygulamaları sahnedeki yerini almıştır. Her ne kadar çok hızlı gelişen ve görece kısa süren bir geçmişe sahip olsalar da, COVID-19 pandemisi ile ilgili geliştirilen mobil sağlık uygulamalarının özellikle güvenilirlik, performans, kullanılabilirlik, destekleyicilik, güvenlik, mahremiyet, esneklik, cevap verme performansı, kullanım kolaylığı ve kültürel duyarlılık açılarından iyileşmeye açık oldukları tespit edilmiştir [43]. Bu bağlamda, pandeminin hızlı ilerlemesi ve yayılması da dezavantaj oluşturmuştur. Bunların ötesinde, 5G IoT, uç bilişimi ve sis bilişimi gibi değerli teknolojik gelişmelere rağmen, güvenlik, mahremiyet ve kullanılabilirlik hususları günümüz ve yakın gelecekteki mobil sağlık uygulamaları için özellikle odaklanması ve ilerleme kaydedilmesi gereken alanlar olarak görülmektedir. Öte yandan ilgili ülke ve organizasyonların bağlamsal gerçekleri de başarı için özellikle dikkate alınması gereken önemli bazı hususlar olarak ortaya çıkmaktadır [44]. Her ne kadar küresel çalışmalar önemli, gerekli ve değerli olsalar da, bu çalışmalar yerel gerçeklerle harmanlanmadıkça beklenen fayda ve yararın oluşması önemli seviyede güçleşmektedir.

Mobil sağlık uygulamalarının karşılık bulduğu bir diğer alan ise depresyon yönetimidir. Fakat depresyon yönetimine dair söz konusu uygulamaların oldukça heterojen olduğu ve bunların geliştirilmesi, tanımlanması ve değerlendirilmesine yönelik standartların eksikliği göze çarpmaktadır [45]. Buna ek olarak, mobil sağlık uygulamalarında başarıyı etkileyen önemli

unsurlardan biri de elektronik sağlık okuryazarlık seviyesi olarak görülebilir. Bir araştırmada [46], eczacılık öğrencilerinin elektronik sağlık okuryazarlık seviyelerinin mobil sağlık uygulamaları hakkında bilgi ve davranışlarını etkilemede önemli olduğu savunulmuştur. Yine aynı araştırmanın sonuçlarına göre, sağlık profesyonelleri tarafından geliştirilen uygulamaları, eczacılık öğrencileri diğer kişilere göre daha güvenle ve istekle tavsiye etmektedirler. Bu durum, ilgili paydaşların sürece etkin katılımı hususunun başarıyı yönlendirmedeki etkisinin önemli bir örneğidir.

Mobil sağlık uygulamalarının tıbbi amaçlarla kullanımı, yasal boyutu incelemeye ve gelişmeye muhtaç bir konu olarak ortaya çıkmaktadır. Kullanım amacı kavramının zaman zaman farklı algılanması ve uygulamasının bir sonucu olarak, özellikle Avrupa bölgesinde mobil sağlık uygulamaları için ilgili Tıbbi Araç Direktifi'nin nadiren dikkate alındığı tespit edilmiştir [47]. Bazı durumlarda tıbbi amaç için kullanılabilen mobil sağlık uygulamaları, kullanım amacı kavramının uygulama geliştiriciler tarafından farklı yorumlanması neticesinde, ilgili direktiflerin gerekli olan katı kurallarını karşılamadan pazara çıkabilmekte, bu durum da büyük bir tehdit oluşturabilmektedir. Dolayısıyla, özellikle Avrupa bölgesinde sadece kullanım amacı odaklı değil, risk ve tehdit odaklı da bir değerlendirme ile, bir takım mobil sağlık uygulamalarının daha iyi rafine edilmiş kuralları ile güvenilebilirliklerinden emin olunduktan sonra pazara arzları düzenleme hâline getirilmelidir. Bu konu politikacılar ve ilgili otoritelerin özellikle ilgilenmeleri gereken bir husustur.

Bir başka araştırma sonucunda, mobil sağlık uygulamalarında tasarımın önemine dikkat çekilmiş ve farklı kullanıcı grupları için kullanılabilirlik konusunun hassas bir şekilde dikkate alınması gerektiği vurgulanmıştır [48]. Teknolojik unsurların benimsenmesinde ve kullanılmasında kullanılabilirliğin hayati rolü her zaman akılda tutulmalıdır. Mobil sağlık uygulamalarının özellikle kanser hastalığı ile mücadele eden kişiler için yüksek potansiyelle yarar sağlayacağı değerlendirilebilse de, bu uygulamaların tasarımında ve geliştirilmesinde kullanıcı odaklılık ve işlevsellik çok önemlidir. Öte yandan bu tür uygulamaların kapsamlı ve yeterli bir şekilde test edilerek doğrulanması ve geçerli kılması da, kullanımları öncesi dikkate alınması ve emin olunması gereken bir konudur [49]. Dolayısıyla, kullanılabilirlik ve güvenilebilirlik alanları mobil sağlık uygulamaları bakımından üzerinde daha fazla çalışılması gereken konular olarak değerlendirilebilir.

Önemli bir araştırma [50] sonucunda, işlevsellik ve çekiciliğin uygulamalarının olumlu değerlendirilmesinde etkili unsurlar olduğu doğrulanmıştır. Diğer taraftan, yine aynı araştırma sonucunda, ilgili uygulamaların ileri düzeyde ve karmaşık işlevleri eğer yeterince olgun ve tümüyle entegre edilmemişse, çekicilik geride kalmakta ve ötesinde negatif değerlendirmeler oluşmaktadır. Dolayısıyla, mobil sağlık uygulamalarının olgun, işlevsel ve estetik olması başarı için öne çıkmaktadır. Özellikle orta yaşın üzerindeki bireylerin sağlıklarını yönetme ve daha iyi hâle getirmede işlevsel olabilecek mobil sağlık uygulamaları ile ilgili olarak, nelerin benimsenme ve kabullenmeyi etkilediğinin bilinmesi önemlidir. Diğer bir çalışmada [51], yaş ve cinsiyetin bu türden uygulamaların kullanılmasında moderasyon etkisi gösterdiği tespit edilmiştir. Dolayısıyla uygulama geliştiricilerin bu türden

bağlamsal ve özel unsurları gereğince dikkate almaları önerilmektedir.

Makalenin bu bölümünde yer verilen ve açıklanan kritik başarı faktörleri ve iyileşmeye açık alanlar, mobil sağlık uygulamaları alanının hem mevcut potansiyelini ortaya koymakta hem de hangi bağlamlarda nasıl iyileşebileceğini göstermektedir. İlgili paydaşların, etraflıca açıklanan bu hususları dikkate alarak alanın gelişme göstermesine kayda değer katkı sağlayabilecekleri düşünülmektedir.

3. HWOV (Ofis Çalışanları için Daha Sağlıklı Çalışma) Mobil Sağlık Uygulaması

Bu bölümde, ofis çalışanları için daha sağlıklı çalışma rutinini oluşturmak, pekiştirmek ve iyileştirmek temel amacı ile geliştirilen HWOV [13] isimli mobil sağlık uygulamasına ilişkin problem ve değer tanımı, çözüm, rakipler, ana işlevler, gereksinimler, ertelenen özellikler ile gelecek planına ilişkin kapsamlı bilgiler sunulmaktadır.

3.1. Problem ve Değer Tanımı

Mevcut endüstriyel yaşam ve düzende ofis işi yapan kayda değer sayıda insan vardır ve bu insanlar gün boyu bilgisayar ve/veya masa başında oturarak zamanlarını geçirmektedirler. Açıkçası, bu insanlar genellikle zamanlarının çoğunu bilgisayarların başında ve ofislerde nispeten hareketsiz geçirmektedirler. Bu insanlar tipik olarak altın yakalı ve beyaz yakalı şekilde isimlendirilen insanlardır. Bu tür insanlar gün boyunca çok fazla aktif olmadan (fiziksel aktivite), iş hayatlarını sürdürmektedirler. Öte yandan, sağlıklı veya daha sağlıklı bir yaşam sürdürmek için, insanların "aktif" günler yaşaması gerektiği artık bilinmektedir. Bu bağlamda, insanlar genellikle ne kadar aktif olurlarsa, o kadar sağlıklı olabilmektedirler.

Diğer taraftan, ofis çalışanları için aktif olmak, bu insanlar genellikle stresli işler yaptıkları ve zamanlarının çoğunu çok sınırlı bir aktiflikle geçirdikleri için son derece önemlidir. Aktiviteyi/aktifliği sağlamaya ve/veya teşvik etmeye ek olarak, bu insanlara daha sağlıklı çalışma ve bu rutini korumak için bazı ipucu ve püf noktaları da hatırlatmak gerekir. Sonuç olarak, bu tür insanların ofis çalışma alanlarındaki zamanlarını daha sağlıklı bir şekilde düzenlemelerine ve yönetmelerine destek olacak bir ürüne ve çözüme ihtiyaç vardır.

Bu makalenin 2.1 Örnekler bölümünde listelenen ve açık literatürde yer alan iyi uygulama örneklerinde maalesef bu türden bir mobil sağlık uygulaması örneği görülmemiştir. Bu gerçek de, geliştirilen özgün uygulamanın özgünlüğünü ve potansiyelini ortaya koymaktadır.

3.2. Çözüm / Ürün – HWOV

Ofis çalışanlarının daha sağlıklı bir çalışma rutini oluşturmaları ve sürdürmelerine yardımcı olmak için HWOV adlı bir mobil sağlık uygulaması oluşturuldu. HWOV, ofis çalışanlarının daha aktif ve sağlıklı bir çalışma hayatı deneyimlemesi için tasarlandı. Yoğun programlar ile fazla stres ve rekabet nedeniyle, ofis çalışanları daha sağlıklı bir bağlam yaratmak için, iş yaptıkları yerdeki yaşamlarını olumlu şekilde düzenlemek ve yönetmek için bir "desteğe" ihtiyaç duyuyorlar. HWOV işte bu desteği sağlamak için tasarlandı ve

geliştirildi. Özgün olarak geliştirilen HWOW için neden, nasıl ve ne sorularının cevapları şunlardır:

- NEDEN: Daha sağlıklı bir ofis çalışmasına ulaşmak ve bunu sürdürmek.
- NASIL: iPhone ve Apple Watch üzerinde çalışan bir mobil uygulama kullanarak
- NE: HWOW

HWOW'nın mobil uygulama geliştirme süreci için temelde Lean Startup metodolojisi uygulandı. Bu kapsama bir kanvas oluşturuldu. Öte yandan, araç olarak Swift aracı geliştirme ve test için kullanıldı. Bu bağlamda, özellikle asgari uygun ürün (MVP) özelliklerine karar vermek için yeni bir anket hazırlandı ve uygulandı. Anketin başında, "Ofis çalışma alanlarındaki zamanınızı daha sağlıklı bir şekilde düzenlemek için HWOW gibi bir uygulamadan yararlanmak ister misiniz?" sorusu soruldu ve katılımcıların %86'sı (N = 100) "Evet" cevabını verdi. Bunlara ek olarak, Tablo 1 uygulanan ilgili anketin kapsamlı sonuçlarını göstermektedir.

Tablo 1: HWOW için asgari uygun ürün (MVP) potansiyel kullanıcı beklenti anketi sonuçları

Kullanıcı Değerlendirmesi			
Fonksiyon ve Faydalar	Kesin Olmalı %	Olsa İyi Olur %	Gerek Yok %
Ara verme (mola) hatırlatmaları	77	23	0
Hızlı ipuçları	75	21	4
Yakılan kalori	86	12	2
Su içme hatırlatma	80	19	1
Ayağa kalkma hatırlatma	91	6	3
Derin nefes alma hatırlatma	86	9	5
İyi düzenlenmiş diyet listeleri	66	25	9
Yürüyüşlü toplantı zamanlama	56	31	13
Elleri yıkama hatırlatıcısı	77	12	11
Aktivite ayrıntıları	81	13	6
İş arkadaşları arasında oyunlaştırma	7	77	16
Sonuçları paylaşmak için gruplar oluşturma	19	54	27
Yeşil alan kontrolü	35	35	30
Işık yoğunluğu analizi	20	54	26
Kalabalıklık ve düzen analizi	19	47	34
İş arkadaşı ile çak bir beşlik hatırlatıcısı	11	45	44
Sevdiğini aramak için hatırlatma	27	32	41

3.3. Rakipler

Özellikle ofis işi yapan beyaz ve altın yakalı çalışanlar için tasarlandığı ve bütünlük (hepsi bir arada) bir çözüm olduğu için, HWOW'nın görece orijinal ve rekabetçi bir ürün ve servis olduğu değerlendirilmektedir. Öte yandan, Apple'nın App Store'unda bazı benzer uygulamalar mevcuttur. Tablo 2,

HWOW'ı diğer ilgili uygulamalarla kapsamlı bir şekilde karşılaştırmak için belirli boyutlar konusunda dikkate değer ayrıntılar sağlamaktadır.

Tablo 2: Rakiplerin karşılaştırılması

Ürün / Boyut	FitWell	Water Minder	Activity	HWOW
Geliştirici / Kuruluş	FitWell	Funn Media	Apple	MD
iPhone ile Çalışır	✓	✓	✓	✓
Apple Watch ile Çalışır	✓	✓	✓	✓
Fiyat Politikası	Ücretli	Ücretsiz	Ücretsiz	Ücretsiz
Reklam	✗	✗	✗	✓
Para Kazanma	Üyelik	Reklam	Apple	Reklam
Özelleştirme	✓	✓	✓	✓
Ön Tanımlı Modlar	✓	✓	✓	✓
Oyunlaştırma	✓	✓	✓	✓
iPhone ve Apple Watch Üzerinden Bilgilendirme	✓	✓	✓	✓
Yakılan Kalori	✓	✗	✓	✓
Su İçme Hatırlatma	✓	✓	✗	✓
Ayağa Kalkma Hatırlatma	✗	✗	✓	✓
Aktivite İzleme	✓	✓	✓	✓
Nefes Alma Hatırlatma	✗	✗	✓	✓
Diyet Listeleri	✓	✗	✗	✓
Sonuçları Paylaşmak için Grup Oluşturma	✗	✗	✓	✓
Günün İpucu	✗	✗	✗	✓
Temiz Hava Hatırlatma	✗	✗	✗	✓
Yeşil Kontrolü	✗	✗	✗	✓
Işık Analizi	✗	✗	✗	✓
Kalabalık ve Düzen Analizi	✗	✗	✗	✓
Ara Verme Hatırlatma	✗	✗	✗	✓
Kalp Atışı	✓	✗	✓	✓
Yürüyüşlü Toplantı Zamanlama	✗	✗	✗	✓
El Yıkama Hatırlatma	✗	✗	✗	✓
İş Arkadaşı ile Çak Bir Beşlik	✗	✗	✗	✓
Egzersiz Programları	✓	✗	✓	✗
Analitikler	✓	✓	✓	✓

3.4. HWOW Ana İşlevleri ve Gereksinimleri

3.4.1. Ana İşlevler

- Hatırlatıcılar ve Bildirimler (Mola Ver, Su İç, Ayağa Kal, Derin Nefes Al, Ellerini Yık)

- Hem iPhone hem de Apple Watch'taki Bildirimler
- İpuçları (Asansörü değil merdivenleri kullanın. Uzun yoldan gidin. Kısa öğle vakti uykusu ile enerji toplayın. Mola verin. Açık ve temiz havada dışarı çıkın. Kahvaltı yapın. Sağlıklı bir öğle yemeği yiyein.)
- İyi Hazırlanmış Diyet Listeleri
- Yürüyüş ile Toplantı Zamanlama
- Yağ Yakma Yürüyüşü

3.4.2. Gereksinimler

HWOW için belirlenen ana gereksinimler şu şekilde listelenebilir:

- HWOW iki moda sahip olacaktır ("Gelişmiş" ve "Normal").
- Kullanıcı, HWOW'ın başlangıcında tercih ettiği modu seçebilecektir.
- Gelişmiş moddaki HWOW, kullanıcıların istediği parametreleri ayarlamasına izin verecektir.
- Normal moddaki HWOW, 08:00 - 18:00 arasında her saat başı ara vermeleri için kullanıcıları bilgilendirecektir.
- Normal modda HWOW, her iki saatte bir, 08:00 - 18:00 saatleri arasında, kullanıcılara rastgele ipuçları gösterecektir.
- HWOW kullanıcıların nabzını ölçmesine izin verecektir.
- Kullanıcı yaktığı kalorileri görebilecektir.
- Normal modda HWOW, saat 08:30 - 18:30 arasında her saat başı su içmek için bildirimde bulunacaktır.
- Normal modda HWOW, kullanıcıları saat 08:55 - 17:55 arasında saatte bir kez ayağa kalkmaları için bilgilendirecektir.
- Normal moddaki HWOW, kullanıcıları 08:00 - 18:00 arasında saatte bir derin nefes almaları için uyaracaktır.
- Normal modda HWOW, kullanıcıları 10:00 - 18:00 saatleri arasında her 4 saatte bir el yıkamak için bilgilendirecektir.
- Normal modda HWOW, kullanıcılara sevdiklerini 10:00 - 18:00 arasında rastgele bir kez aramalarını hatırlatacaktır.
- HWOW, kullanıcıların yürüyerek toplantı zamanlamasına izin verecektir.
- HWOW planlanan toplantı süresi bittiğinde kullanıcıya bilgi verecektir.
- HWOW, kullanıcılara her gün için iyi düzenlenmiş diyet listeleri gösterecektir.

3.5. Ertelenen Özellikler

Listelenen şu öğeler, kaynak kısıtları gerekçesiyle şimdilik ertelenmiştir ve bunlar ilk versiyondan sonra yeniden değerlendirilecektir:

- İş arkadaşları arasında oyunlaştırma özellikleri,

- Aktivite ayrıntıları,
- Sonuçları paylaşmak için gruplar oluşturmak,
- Ortamdaki yeşil yoğunluğunun değerlendirilmesi,
- Işık yoğunluk analizörü ve
- Gelişmiş mod (kullanıcılar tarafından ayarlanan parametreler).

3.6. HWOW'ın Geleceği

İlk sürümünün analiz, tasarım, geliştirme ve test aşamaları tamamlanan HWOW mobil sağlık uygulamasının, uygun ve yeterli kaynak ve finansmanın sağlanması durumunda, dış kaynak kullanımı yöntemi ile tüm fonksiyonları içerecek şekilde tamamlanması planlanmaktadır. Bu süreçte, COVID-19 pandemisi sonrası pekişen evden çalışma rutini ile ilgili birtakım işlev ve özelliklerin de ürüne eklenmesi öngörülmektedir. Bu aşama sonrasında, ürün Android platformu için de geliştirilecektir.

4. Çıkarımlar

İlgili diğer önemli çalışmaların kapsamlı bir şekilde gözden geçirilmesi ile damıtılması ve mobil sağlık kapsamında özgün bir uygulamanın geliştirilmesi süreci ve sonucunda birtakım çıkarımlar yapılmıştır. Alandaki ilgili paydaşların (uygulama geliştiriciler, politikacılar ve araştırmacılar) istifadesine sunulan önemli çıkarımlar şu şekilde listelenebilir:

- Mobil sağlık uygulamalar toplumda yer alan tüm farklı gruplar (yaş, sağlık durumu, yaşam tarzı vb.) için yararlı olabilecek bir potansiyel barındırmaktadır. COVID-19 pandemisi sonrasında önemi ve anlamı herkes tarafından bir kez daha derinden anlaşılan sağlık konusunun, mobil sağlık uygulamaları ile mümkün olan her aşamada desteklenmesi ve yönetilmesi mümkün ve gereklidir.
- Gizlilik, güvenlik, mahremiyet ve güvenilebilirlik konuları mobil sağlık uygulamaları açısından oldukça önemli, gerekli ve değerlidir. Sağlık söz konusu olduğunda, hem kullanıcıların hassas ve değerli bilgilerini gizlilik, güvenlik ve mahremiyet açısından tam olarak karşılayan hem de işlevsellik açısından yeterince doğrulanmış ve güvenilebilir ürünlere (mal ve hizmetler) ihtiyaç vardır.
- Mobil sağlık uygulamalarının, hem geliştirme süreçlerinde hem de geliştirme süreçleri sonrası yayımlanmadan önce, olgunluklarının değerlendirilmesi için kural ve politikalar oluşturulması kapsamında ciddi bir çalışma yapılması ihtiyacı bulunmaktadır. Özellikle, ortaya çıkan mobil sağlık uygulamalarının herkesin kullanımına sunulmadan önce bir sertifikasyon veya belgelendirme sürecine tabi tutulması önemli ve gerekli görülmektedir. Politikacılar ve idareciler tarafından, bu bağlamda nasıl bir yol, yöntem veya süreç izleneceği ile ilgili paydaşların hareket tarzları bilgilerini sağlayan net ve kapsamlı bir düzenlemeye gerek duyulduğu değerlendirilmektedir.
- Olgun ve işe yarar mobil sağlık uygulamalarının ilgili tüm paydaşlar tarafından kullanılmasının özendirilmesine ve desteklenmesine yönelik net bir gereksinim olduğu düşünülmektedir. Temelde hem kullanışlılık hem de

kullanım kolaylığını odaklayan bir teknoloji benimseme modeli çerçevesinde istifade edilerek, ilgili tüm aktörler tarafından bu uygulamalara ilişkin tutum ve davranış olumlu yönde evirmek ve geliştirmek üzere ilave araştırmalar ve çalışmalar yapılmasının uygun olacağı değerlendirilmektedir.

- Giyilebilir medikal cihazlar, 5G IoT, uç bilişim ve mobil teknolojiler alanlarında ortaya çıkan heyecan verici gelişmelerin, canlılar için en önemli konu olan sağlığın yönetilmesi ve iyileştirilmesi için akıllı ve bilinçli bir şekilde kullanılması oldukça hayati bir gündem maddesi olarak ilgililerin ajandalarında yerlerini almalıdır. Hem yerel otoritelerin hem de küresel aktörlerin bu fırsatı özellikle kaçırmamaları tüm paydaşlar için tatmin edici ve iyileştirici sonuçlar doğuracaktır.
- Her ne kadar COVID-19 pandemisi sonrasındaki süreçte ofis çalışanları bazı sektörlerde kısmen evlere taşınmış olsa da, bilgisayar veya masa başında bütün gün görece hareketsiz olarak çalışan altın veya beyaz yakalı çalışanlar, kendileri için özel olarak tasarlanmış ve geliştirilmiş bir mobil sağlık uygulaması ile sağlıkları ve kendileri için önemli yararlar sağlayabileceklerdir. Bu bağlamda, işyerinden eve taşınan bilgisayar veya masa başı işlerde çalışan kişilerin, evlerin yapısı (kısıtlı alan, az etkileşim) gereği eskisinden daha az hareket edebiliyor ve daha az aktivite yapıyor oldukları da başka bir gerçektir. Bu yönüyle bakıldığında, HWOW ve benzeri uygulamaların evden çalışanlar için de oldukça faydalı olabileceği bilinmelidir.
- Mobil sağlık uygulamalarının tasarlanması ve geliştirilmesi aşamalarında hem başarıyı arttırmak hem de olası gereksiz maliyetleri minimuma indirmek için ilgili paydaşların (potansiyel kullanıcılar, alan uzmanları, politikacılar, sağlık profesyonelleri vb.) girdilerine ve görüşlerine başvurulması önemli bir başarı unsuru olarak görülmelidir. Mobil sağlık uygulaması geliştirme işi sadece teknik bir mühendislik çözümü faaliyeti olarak görülmemeli, işin sosyal, kültürel ve mevzuatsal perspektifleri de mümkün olan en erken aşamalarda kapsamlı olarak ele alınmalıdır.
- Özellikle çeşitli seviyelerden ve ilgili uzmanlık alanlarından sağlık profesyonellerinin (doktorlar, hemşireler, bakıcılar vb.) mobil sağlık uygulamaları konusunda daha fazla bilinçlendirilmesi ve ilgisi ve gereğine göre bu aktörlerin mobil sağlık uygulamalarının geliştirilmesi süreçlerine dâhil edilmesi ve güncel gelişmelerden haberdar edilmeleri anlamlı ve yararlı olacaktır. Bu sayede, etkili alan uzmanlarının ve değişim araçlarının görüşleri ile desteklenmiş ve olgunlaştırılmış fikir, kurgu, tasarım ve uygulamalar ortaya çıkabilecektir.

5. Sonuç

Bu makalede, sağlık ve teknolojinin kesişiminde ortaya çıkan ve zamanla daha kayda değer bir hâl alan mobil sağlık uygulamaları konusunun güncel mevcut durumu genel olarak ele alındı, örneklendirildi ve bu bağlamda başarı için önemli hususlar ile iyileşmeye açık alanlar ortaya konuldu. Öte yandan, mobil sağlık uygulamaları alanının aktüel mevcut durumu ve geleceğine yönelik birtakım çıkarım ve değerlendirmelere yer verildi. Diğer taraftan, ofis çalışanları (bilgisayar veya masa başında bütün gün görece hareketsiz olarak çalışan altın veya

beyaz yakalı çalışanlar) için daha sağlıklı bir çalışma ortamı ve deneyimini oluşturmak ve desteklemek için özgün olarak tasarlanan ve ilk versiyonu geliştirilen, HWOW isimli mobil sağlık uygulaması ile ilgili açıklayıcı ve kapsamlı bilgiler paylaşıldı.

Bu makalenin ortaya koyduğu güncel analiz, değerlendirme, deneyim, çıkarım ve sonuçların ilgi duyan mobil sağlık uygulama geliştiricileri, ilgili politikacılar ve alandaki araştırmacılar için işe yarar ve görece yönlendirici olabileceği değerlendirilmektedir. Öyle ki, mobil sağlık uygulama geliştiricileri, alan ile ilgili mevcut güncel durumu görebilecek ve kendi ürün ve hizmetlerini bunlara göre değerlendirme ve kıyaslama fırsatı yakalayabileceklerdir. Öte yandan, politikacılar, özellikle kural ve regülasyonların başarılı bir şekilde oluşturulmasında ve iyileştirilmesinde temelde neleri dikkate alabilecekleri konusunda kapsamlı bir çözümlenmeye erişebileceklerdir. Diğer taraftan, ilgili diğer araştırmacılar, teorik ve pratik açılardan mobil sağlık uygulamaları alanında güncel mevcut büyük resmi görebilecekler ve kendi araştırmalarını bu perspektifle yönlendirebileceklerdir.

İlave bir araştırma olarak, mobil sağlık uygulamalarının belgelendirilmesi veya sertifikalandırılması için hem ulusal hem de uluslararası arenada kullanılacak bir kural seti ve kurgunun oluşturulması ve geliştirilmesi cazip bir yönelim olabilecektir. Diğer yandan, mobil sağlık uygulamalarının yararlarını ilgili bağlamlar için kamta dayalı olarak araştıran ve objektif biçimde ortaya koyan ve tartışan ilave çalışmalar bir diğer sonraki araştırma ajanda konusu olarak dikkate alınabilir.

Bir başka potansiyel çalışma alanı ise halihazırda mobil uygulama mağazalarında olan mobil sağlık uygulamalarının analizi ve değerlendirilmesidir. Bu makale her ne kadar açık literatürde yer alan güncel birtakım örnekleri ortaya koymuş olsa da, mobil uygulama mağazalarında yer alan fakat bilimsel literatürde henüz olmayan mobil sağlık uygulamalarının da kapsamlı bir şekilde analiz edilmesi ve değerlendirilmesi, bu bağlamdaki bilgi birikiminin gelişimi için yararlı olabilecektir.

6. Kaynaklar

- [1] H. Oh, C. Rizo, M. Enkin, A. Jadad, J. Powell, and C. Pagliari, "What Is eHealth (3): A Systematic Review of Published Definitions," *J. Med. Internet Res.*, vol. 7, no. 1, pp. 1–12, Feb. 2005, doi: 10.2196/jmir.7.1.e1.
- [2] V. Della Mea, "What is e-Health (2): The death of telemedicine?," *J. Med. Internet Res.*, vol. 3, no. 2, p. e22, Jun. 2001, doi: 10.2196/jmir.3.2.e22.
- [3] WHO, "New horizons for health through mobile technologies: second global survey on eHealth," Geneva: World Health Organization, Jun. 2010.
- [4] S. Agarwal *et al.*, "Guidelines for reporting of health interventions using mobile phones: mobile health (mHealth) evidence reporting and assessment (mERA) checklist," *BMJ*, vol. 352, p. i1174, Mar. 2016, doi: 10.1136/bmj.i1174.
- [5] S. R. Steinhubl, E. D. Muse, and E. J. Topol, "Can Mobile Health Technologies Transform Health Care?," *JAMA*, vol. 310, no. 22, pp. 2395–2396, Dec. 2013, doi: 10.1001/jama.2013.281078.
- [6] R. S. H. Istepanian and T. Al-Anzi, "m-Health 2.0: New perspectives on mobile health, machine learning and big

- data analytics,” *Methods*, vol. 151, no. June, pp. 34–40, Dec. 2018, doi: 10.1016/j.ymeth.2018.05.015.
- [7] D. Vogel, D. Viehland, N. Wickramasinghe, and J. M. Mula, “Mobile health,” *Electron. Mark.*, vol. 23, no. 1, pp. 3–4, Mar. 2013, doi: 10.1007/s12525-013-0121-y.
- [8] L. Leung and C. Chen, “E-health/m-health adoption and lifestyle improvements: Exploring the roles of technology readiness, the expectation-confirmation model, and health-related information activities,” *Telecomm. Policy*, vol. 43, no. 6, pp. 563–575, Jul. 2019, doi: 10.1016/j.telpol.2019.01.005.
- [9] J. Zhao, B. Freeman, and M. Li, “Can Mobile Phone Apps Influence People’s Health Behavior Change? An Evidence Review,” *J. Med. Internet Res.*, vol. 18, no. 11, p. e287, Nov. 2016, doi: 10.2196/jmir.5692.
- [10] X. Lai, Q. Liu, X. Wei, W. Wang, G. Zhou, and G. Han, “A Survey of Body Sensor Networks,” *Sensors*, vol. 13, no. 5, pp. 5406–5447, Apr. 2013, doi: 10.3390/s130505406.
- [11] F. Ghahramani and J. Wang, “Impact of Smartphones on Quality of Life: A Health Information Behavior Perspective,” *Inf. Syst. Front.*, vol. 22, no. 6, pp. 1275–1290, Dec. 2020, doi: 10.1007/s10796-019-09931-z.
- [12] B. Klimova, “Mobile Health Devices for Aging Population Groups: A Review Study,” in *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, vol. 9847 LNCS, Springer Verlag, 2016, pp. 295–301.
- [13] M. Degerli, “A Mobile Health Application for Healthy Living: HWOW (Healthier Work for Office Workers),” in *2020 Turkish National Software Engineering Symposium (UYMS)*, Oct. 2020, pp. 1–3, doi: 10.1109/UYMS50627.2020.9247024.
- [14] M. A. LoPresti *et al.*, “Clinical Trials Using Mobile Health Applications,” *Pharmaceut. Med.*, vol. 29, no. 1, pp. 17–25, Feb. 2015, doi: 10.1007/s40290-015-0085-7.
- [15] M. J. Duncan and G. S. Kolt, “Learning from community-led and co-designed m-health interventions,” *Lancet Digit. Heal.*, vol. 1, no. 6, pp. e248–e249, Oct. 2019, doi: 10.1016/S2589-7500(19)30125-6.
- [16] A. Puig-Ribera *et al.*, “Impact of a workplace ‘sit less, move more’ program on efficiency-related outcomes of office employees,” *BMC Public Health*, vol. 17, no. 1, p. 455, Dec. 2017, doi: 10.1186/s12889-017-4367-8.
- [17] M. Z. Goraczek *et al.*, “Mobile Health ID Card,” in *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, vol. 10748 LNCS, Springer Verlag, 2018, pp. 394–402.
- [18] J. Osborn, A. Ajakaiye, T. Cooksley, and C. P. Subbe, “Do mHealth applications improve clinical outcomes of patients with cancer? A critical appraisal of the peer-reviewed literature,” *Support. Care Cancer*, vol. 28, no. 3, pp. 1469–1479, Mar. 2020, doi: 10.1007/s00520-019-04945-4.
- [19] K. Trang, P. S. Sullivan, D. E. Hinton, C. M. Worthman, M. G. Le, and T. Jovanovic, “Feasibility, acceptability, and design of a mobile health application for high-risk men who have sex with men in Hanoi, Vietnam,” *Lancet Glob. Heal.*, vol. 8, p. S14, Apr. 2020, doi: 10.1016/S2214-109X(20)30155-8.
- [20] L. Halili, R. Liu, K. A. Hutchinson, K. Semeniuk, L. M. Redman, and K. B. Adamo, “Development and pilot evaluation of a pregnancy-specific mobile health tool: a qualitative investigation of SmartMoms Canada,” *BMC Med. Inform. Decis. Mak.*, vol. 18, no. 1, p. 95, Dec. 2018, doi: 10.1186/s12911-018-0705-8.
- [21] F. Wu, H. Zhao, Y. Zhao, and H. Zhong, “Development of a Wearable-Sensor-Based Fall Detection System,” *Int. J. Telemed. Appl.*, vol. 2015, pp. 1–11, 2015, doi: 10.1155/2015/576364.
- [22] S. Attwood, H. Parke, J. Larsen, and K. L. Morton, “Using a mobile health application to reduce alcohol consumption: a mixed-methods evaluation of the drinkaware track & calculate units application,” *BMC Public Health*, vol. 17, no. 1, p. 394, Dec. 2017, doi: 10.1186/s12889-017-4358-9.
- [23] V. L. A. Berauk, M. K. Murugiah, Y. C. Soh, Y. C. Sheng, T. W. Wong, and L. C. Ming, “Mobile Health Applications for Caring of Older People: Review and Comparison,” *Ther. Innov. Regul. Sci.*, vol. 52, no. 3, pp. 374–382, May 2018, doi: 10.1177/2168479017725556.
- [24] E. Alepis and C. Lambrinidis, “M-health: supporting automated diagnosis and electronic health records,” *Springerplus*, vol. 2, no. 1, p. 103, Dec. 2013, doi: 10.1186/2193-1801-2-103.
- [25] H. Kim *et al.*, “Mobile Health Application and e-Health Literacy: Opportunities and Concerns for Cancer Patients and Caregivers,” *J. Cancer Educ.*, vol. 34, no. 1, pp. 3–8, Feb. 2019, doi: 10.1007/s13187-017-1293-5.
- [26] I. D. Lestantri, Putrima, A. Sabiq, and E. Suherlan, “Developing and pilot testing M-health care application for pregnant and toddlers based on user experience,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 978, no. 1, p. 012067, Mar. 2018, doi: 10.1088/1742-6596/978/1/012067.
- [27] G. Andria *et al.*, “A novel approach for design and testing digital m-health applications,” in *2015 IEEE International Symposium on Medical Measurements and Applications (MeMeA) Proceedings*, May 2015, pp. 440–444, doi: 10.1109/MeMeA.2015.7145244.
- [28] M. Paschou, E. Sakkopoulos, and A. Tsakalidis, “easyHealthApps: e-Health Apps Dynamic Generation for Smartphones & Tablets,” *J. Med. Syst.*, vol. 37, no. 3, p. 9951, Jun. 2013, doi: 10.1007/s10916-013-9951-6.
- [29] K. Han, M. Jung, and J. Cho, “Implementation of the personal healthcare services on automotive environments,” *Pers. Ubiqu. Comput.*, vol. 18, no. 3, pp. 523–533, Mar. 2014, doi: 10.1007/s00779-013-0672-0.
- [30] S. Riaz and C. Sykes, “Are smartphone health applications effective in modifying obesity and smoking behaviours? A systematic review,” *Health Technol. (Berl.)*, vol. 5, no. 2, pp. 73–81, Jul. 2015, doi: 10.1007/s12553-015-0104-4.
- [31] A. Väänänen, K. Haataja, M. Asikainen, I. Jantunen, and P. Toivanen, “Mobile Health Applications: A Comparative Analysis and a Novel Mobile Health Platform,” in *Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering, LNICST*, vol. 143, Springer Verlag, 2015, pp. 71–81.
- [32] O. Banos *et al.*, “Design, implementation and validation of a novel open framework for agile development of mobile health applications,” *Biomed. Eng. Online*, vol. 14, no. Suppl 2, p. S6, Aug. 2015, doi: 10.1186/1475-925X-14-S2-S6.
- [33] M. Ahmad, M. B. Amin, S. Hussain, B. H. Kang, T. Cheong, and S. Lee, “Health Fog: a novel framework for health and wellness applications,” *J. Supercomput.*, vol. 72, no. 10, pp. 3677–3695, Oct. 2016, doi:

- 10.1007/s11227-016-1634-x.
- [34] J. Bravo, R. Hervás, J. Fontecha, and I. González, “m-Health: Lessons Learned by m-Experiences,” *Sensors*, vol. 18, no. 5, p. 1569, May 2018, doi: 10.3390/s18051569.
- [35] J. N. S. Rubí and P. R. de L. Gondim, “Interoperable Internet of Medical Things platform for e-Health applications,” *Int. J. Distrib. Sens. Networks*, vol. 16, no. 1, p. 155014771988959, Jan. 2020, doi: 10.1177/1550147719889591.
- [36] A. Gorini, K. Mazzocco, S. Triberti, V. Sebrì, L. Savioni, and G. Pravettoni, “A P5 Approach to m-Health: Design Suggestions for Advanced Mobile Health Technology,” *Front. Psychol.*, vol. 9, no. October, pp. 1–8, Oct. 2018, doi: 10.3389/fpsyg.2018.02066.
- [37] E. Jovanov, “Wireless Technology and System Integration in Body Area Networks for m-Health Applications,” in *2005 IEEE Engineering in Medicine and Biology 27th Annual Conference*, 2005, pp. 7158–7160, doi: 10.1109/IEMBS.2005.1616158.
- [38] J. F. Jones, S. A. Hook, S. C. Park, and L. M. Scott, “Privacy, Security and Interoperability of Mobile Health Applications,” in *Universal Access in Human-Computer Interaction. Context Diversity.*, vol. 6767, 2011, pp. 46–55.
- [39] B. Martínez-Pérez, I. de la Torre-Díez, and M. López-Coronado, “Privacy and Security in Mobile Health Apps: A Review and Recommendations,” *J. Med. Syst.*, vol. 39, no. 1, p. 181, Jan. 2015, doi: 10.1007/s10916-014-0181-3.
- [40] K. Knorr, D. Aspinall, and M. Wolters, “On the Privacy, Security and Safety of Blood Pressure and Diabetes Apps,” in *IFIP International Federation for Information Processing 2015*, vol. 455, H. Federrath and D. Gollmann, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2015, pp. 571–584.
- [41] P. Olla and C. Shimskey, “mHealth taxonomy: a literature survey of mobile health applications,” *Health Technol. (Berl.)*, vol. 4, no. 4, pp. 299–308, Apr. 2015, doi: 10.1007/s12553-014-0093-8.
- [42] B. Roy, M. Call, and N. Abts, “Development of Usability Guidelines for Mobile Health Applications,” in *Communications in Computer and Information Science*, vol. 1034, Springer Verlag, 2019, pp. 500–506.
- [43] M. N. Islam, I. Islam, K. M. Munim, and A. K. M. N. Islam, “A Review on the Mobile Applications Developed for COVID-19: An Exploratory Analysis,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 145601–145610, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3015102.
- [44] T. I. I. Bessin, A. W. P. Ouédraogo, and F. Guinko, “Mobile Health Applications Future Trends and Challenges,” in *Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering, LNICST*, vol. 311 LNICST, Springer, 2020, pp. 202–211.
- [45] A. Porras-Segovia, I. Díaz-Oliván, L. Gutiérrez-Rojas, H. Dunne, M. Moreno, and E. Baca-García, “Apps for Depression: Are They Ready to Work?,” *Curr. Psychiatry Rep.*, vol. 22, no. 3, p. 11, Mar. 2020, doi: 10.1007/s11920-020-1134-9.
- [46] S. L. Söylemez, N. Uçar, M. Sancar, B. Okuyan, and G. Üstün, “Assessment of the pharmacy students e-health literacy and mobile health application utilization,” *J. Res. Pharm.*, vol. 24, no. 1, pp. 1–7, Jan. 2020, doi: 10.35333/jrp.2020.125.
- [47] E. Mantovani and P. C. Bocos, “Are mHealth Apps Safe? The Intended Purpose Rule, Its Shortcomings and the Regulatory Options Under the EU Medical Device Framework,” in *Mobile e-Health, Human-Computer Interaction Series*, H.R. Marston et al., Ed. Springer International Publishing, 2017, pp. 251–275.
- [48] U. Sarkar et al., “Usability of Commercially Available Mobile Applications for Diverse Patients,” *J. Gen. Intern. Med.*, vol. 31, no. 12, pp. 1417–1426, Dec. 2016, doi: 10.1007/s11606-016-3771-6.
- [49] S. W. Davis and I. Oakley-Girvan, “Achieving value in mobile health applications for cancer survivors,” *J. Cancer Surviv.*, vol. 11, no. 4, pp. 498–504, Aug. 2017, doi: 10.1007/s11764-017-0608-1.
- [50] Y. Alnsour, B. Hazarika, and J. Khuntia, “Health apps’ functionalities, effectiveness, and evaluation,” in *Lecture Notes in Business Information Processing*, 2017, vol. 296, pp. 13–21, doi: 10.1007/978-3-319-69644-7_2.
- [51] A. Nunes, T. Limpo, and S. L. Castro, “Individual Factors that Influence the Acceptance of Mobile Health Apps: The Role of Age, Gender, and Personality Traits,” in *Communications in Computer and Information Science*, vol. 982, Springer Verlag, 2019, pp. 167–179.

Dr. Mustafa DEĞERLİ



Dr. Mustafa DEĞERLİ, çok çeşitli alanlarda deneyimli bir araştırmacı ve profesyoneldir. Dr. Değerli iki farklı alanda doktora derecesine sahiptir. Lisans, yüksek lisans ve doktora derecelerini Orta Doğu Teknik Üniversitesi (ODTÜ)'nden alan Mustafa, Gazi Üniversitesi'nden de bir doktora derecesi almıştır. Dr. Değerli, ODTÜ'deki doktora çalışması ve araştırması ile ODTÜ Lisansüstü Ödülü'nü almıştır. Dr. Mustafa Değerli'nin prestijli uluslararası kitap ve dergilerde yayımlanmış makaleleri bulunmaktadır. Mustafa, dünyaca tanınan PMI-PMP, PMI-RMP, PSM, ITIL, CMMI Associate ve Lead Auditor sertifikalarına sahiptir. Dr. Değerli, iş süreçleri ve performans iyileştirme ve yönetimi, sistem mühendisliği, yazılım mühendisliği, yönetim ve organizasyon, yönetim bilişim sistemleri, proje yönetimi, risk yönetimi, kalite yönetimi, stratejik planlama ve yönetim, sağlık/medikal bilişim ve teknolojiler, teknoloji, yenilik ve araştırma yönetimi gibi birçok alanda deneyim sahibidir ve bu alanlarda araştırmalar ile yayınlar yapmaktadır. Mustafa klasik ve akustik müzikten, tiyatrodan, operadan ve baleden hoşlanmaktadır. Dr. Mustafa Değerli ile iletişim kurmak ve hakkında ek bilgi almak için <https://sites.google.com/view/mustafadegerli/adresi> ziyaret edilebilir.

Geliştirilmiş Atom Arama Optimizasyon Algoritması ile Çok Katmanlı Algılayıcı Eğitimi

A Novel Improved Atom Search Optimization Algorithm for Training Multilayer Perceptron

Davut İzci



Batman Üniversitesi, Batman Türkiye
davut.izci@batman.edu.tr

Öz

Bu makalede atom arama optimizasyonu (ASO) ve benzetilmiş tavlama (SA) algoritmalarının hibritleştirilmesiyle geliştirilen ve iASO olarak isimlendirilen yeni bir hibrit algoritma ele alınmaktadır. SA tekniğinin kullanımı ile ASO algoritmasının arama yeteneği güçlendirilmiştir. Önerilen hibrit algoritmanın doğrusal olmayan sistemleri optimize etmedeki yeteneğini gözlemlemek üzere çok katmanlı algılayıcıyı (MLP) eğiticisi olarak kullanılmıştır. Iris, Balloon, XOR, Breast Cancer ve Heart olmak üzere çeşitli veri kümeleri kullanılmış ve elde edilen sonuçlar orijinal ASO, sine kosinus algoritması (SCA), parçacık sürüsü optimizasyonu (PSO), karınca kolonisi optimizasyonu (ACO), gri kurt optimizasyonu (GWO) ve genetik algoritma (GA) gibi rekabetçi algoritmalar kullanılarak oluşturulmuş diğer MLP eğiticileri ile karşılaştırılmıştır. Balloon veri seti için önerilen iASO algoritması sadece GA algoritmasının gerisinde bir performans sergilemiş olup, karşılaştırma yapılan diğer tüm algoritmalara göre daha iyi performans sergilediği gözlemlenmiştir. Sonuçlar, Balloon veri seti dışında önerilen yaklaşımla daha düşük ortalama kare hatasının (MSE) ortalama ve standart sapmasının elde edildiğini göstermiş ve dolayısıyla daha iyi performansının olduğunu açıkça göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Çok katmanlı algılayıcı, sezgisel-üstü algoritmalar, atom arama optimizasyonu, benzetilmiş tavlama algoritması

Abstract

A novel hybrid algorithm developed by merging atom search optimization (ASO) and simulated annealing (SA) algorithms is presented. The search capability of ASO was improved by using simulated annealing (SA) algorithm. The proposed hybrid algorithm was named as iASO and used for training multilayer perceptron (MLP) to observe its ability for optimizing non-linear systems. Several datasets (Iris, Balloon, XOR, Breast cancer and Heart) were used, and the obtained results were compared with respective recent competitive algorithms such as original ASO, sine cosine algorithm (SCA), particle swarm optimization (PSO), ant colony optimization (ACO), grey wolf optimization (GWO), and genetic algorithm (GA). The performance of the GA was found to be better than the proposed iASO algorithm only for Balloon dataset. However, the proposed iASO was found to have better performance than all other compared algorithms for the respective dataset. Apart from Balloon dataset, the results clearly indicated the performance of the proposed algorithm to be better as the lower average and

standard deviation of mean square error were achieved via the proposed approach.

Keywords: Multilayer perceptron, metaheuristic algorithms, atom search optimization, simulated annealing

1. Giriş

İnsan beyni, yapay sinir ağları (ANN) tarafından hesaplama modelleri aracılığıyla taklit edilebilmekte ve bu sayede geleneksel matematiksel denklemlerin çözmekte zorlandığı karmaşık ve doğrusal olmayan problemler için kullanılabilir [1]. İleri beslemeli sinir ağlarının bir parçası olan çok katmanlı algılayıcı (MLP) [2], oldukça benimsenen bir sinir ağı olup belirli uygulamalarda kullanılması durumunda eğitilmesi gereken bir yapıya sahiptir [3]. Literatür incelendiğinde, söz konusu bu sinir ağının eğitimi için deterministik yaklaşımlara denk gelmek mümkündür [4]. Ancak, yavaş yakınsama ve yerel optimumda sıkışma gibi durumlar ilgili eğitim sürecinde sıklıkla karşılaşılan sorunlardandır. Bu nedenle, bu tür bir yapının eğitimi için daha yetenekli algoritmalara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu noktada sezgisel-üstü algoritmalar daha yetenekli yapılar olarak kullanılabilir.

Sezgisel-üstü algoritmalar MLP eğitiminde arzu edilen sonuçlara ulaşmayı sağlayan alternatif bir yöntem olarak başarısını göstermiştir [5]. Bu algoritmalarından bazıları gri kurt optimizasyonu (GWO) [6], karınca aslanı optimizasyonu (ALO) [7], şempanze optimizasyon algoritması (ChOA) [8], çekirge optimizasyon algoritması (GOA) [9], salp sürüsü algoritması (SSA) [10] ve bu algoritmanın geliştirilmiş versiyonları [11], [12], yer-çekimi arama algoritması (GSA) [13], manyetik optimizasyon algoritması (MOA) [14], yapay alg algoritması (AAA) [15], ağaç tohum algoritması (TSA) [16] ve Harris şahinleri optimizasyonu (HHO) [16] olarak sıralanabilir.

Atom arama optimizasyonu (ASO) [17], son zamanlarda geliştirilen ve moleküler dinamikten esinlenen popülasyon-temelli sezgisel-üstü algoritmalarındandır. Söz konusu bu algoritma çeşitli optimizasyon problemlerinin üstesinden gelmek üzere başarıyla kullanılmıştır [17]–[21]. Ancak diğer birçok sezgisel-üstü algoritmada olduğu gibi, orijinal ASO algoritması da erken yakınsama ve yerel optimuma takılma gibi sorunlar barındırmaktadır [18] ve bu nedenle keşif ve sömürü aşamalarının iyileştirilmesine ihtiyaç duymaktadır.

Sezgisel-üstü algoritmaların sahip olduğu sınırlamaların üstesinden gelmek üzere çeşitli stratejiler önerilmiştir [19]. Hibritleştirme yaklaşımı daha etkili sonuçlar sağladığından,

önerilen stratejiler arasında öne çıkan ve tercih edilen bir yöntem olmuştur. Optimizasyon problemlerinin çözülmesi için sezgisel-üstü yapılar ile hibritleştirilen algoritmalarından biri de benzetilmiş tavlama (SA) algoritmasıdır [22].

SA algoritması yerel arama açısından güçlü olan ve daha az hesaplama süresi gerektiren, bununla beraber uygulanması kolay olan sezgisel-üstü bir tekniktir [23]. Bu özelliğinden dolayı SA algoritmasının hibrit bir model oluşturulmasına olanak tanıyacak şekilde kullanılması mümkündür. Bu durum da söz konusu bu çalışmanın temel motivasyonunu oluşturmakta olup, ASO algoritmasının yukarıda sözü edilen dezavantajlı taraflarının üstesinden gelinmesi amaçlanmaktadır. Bu yolla ASO algoritmasının çözüm kalitesi iyileştirilebilir ve dolayısıyla optimizasyon problemlerinin çözümü için daha iyi bir yapı elde edilebilir.

Bu makale, ASO algoritmasının keşif ve sömürü aşamaları arasındaki denge eksikliğini gidermek üzere SA algoritmasının mükemmel yerel arama yeteneğinin kullanılmasını esas alarak geliştirilmiş atom arama optimizasyonu (iASO) olarak isimlendirilen yeni bir hibrit algoritmayı önermektedir. Geliştirilen bu hibrit algoritma, daha kötü çözümler için SA tekniğini kullanıp, potansiyeli olan komşu çözümlerin de ihmal edilmemesini sağlamaktadır. SA ile ASO algoritmalarının hibritleştirilmesi yoluyla elde edilen iASO algoritmasının, doğrusal olmayan sistem optimizasyonundaki performansını gözlemek üzere MLP eğitiminde kullanılmıştır. Böylelikle, söz konusu bu amaç için daha önce önerilen diğer algoritmalara kıyasla daha iyi performans gösteren bir yapının oluşturulması amaçlanmıştır.

MLP eğitiminde önerilen algoritmanın performansını gözlemek için farklı zorluk seviyelerine sahip Iris, Balloon, XOR, Breast Cancer ve Heart [24] veri kümeleri kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar adil bir karşılaştırma için tüm algoritmaların benzer koşullar altında çalıştırıldığı orijinal ASO, sinüs kosinüs algoritması (SCA), parçacık sürüsü optimizasyonu (PSO), karınca kolonisi optimizasyonu (ACO), gri kurt optimizasyonu (GWO) ve genetik algoritma (GA) gibi yapılar ile oluşturulan MLP eğitimcilerinin sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Önerilen hibrit algoritma için yapılan testler GA algoritmasının sadece Balloon veri seti için önerilen algoritmadan daha iyi performans sergilediğini göstermiş olup geri kalan diğer algoritmalara göre önerilen iASO algoritmasının yine de daha iyi olduğu gözlemlenmiştir. Diğer tüm veri setleri için ise iASO yapısının daha düşük bir ortalama kare hatasına (MSE) ve standart sapmaya sahip olduğunu ve bu sebeple MLP eğitimi için verimli bir optimizasyon algoritması olduğunu gösterirken, karşılaştırmalar bu algoritmanın rakip diğer algoritmalarından daha iyi performansa sahip olduğunu belirlemiştir.

2. ASO Algoritması

Bir önceki bölümde de bahsedildiği üzere, ASO algoritması moleküler dinamiklerden esinlenen popülasyon tabanlı bir küresel optimizasyon tekniğidir [25]. Diğer bir ifade ile, söz konusu bu algoritma klasik mekanikçe göre davranan atomik hareketin matematiksel bir temsildir. Newton'un ikinci yasasına göre, bir atomik sistemdeki ilişki eşitlik (1)'de olduğu gibi yazılabilir.

$$a_i = \frac{F_i + G_i}{m_i} \quad (1)$$

Burada, F_i ve G_i , i . atom üzerinde birlikte etkiyen etkileşim ve kısıtlama kuvvetlerini temsil eder. Atomun ivme ve kütlesi ise sırasıyla a_i ve m_i ile gösterilmektedir. d boyutunda ve t zamanında, j . atomdan kaynaklı i . atoma etki eden etkileşim kuvveti bağıntı (2) ile ifade edilebilir.

$$F'_{ij}(t) = -\eta(t) \left[2(h_{ij}(t))^{13} - (h_{ij}(t))^7 \right] \quad (2)$$

Bu bağıntıda, $\eta(t)$ derinlik fonksiyonu olarak adlandırılır ve bağıntı (3)'te olduğu gibi tanımlanmaktadır. α derinlik ağırlığını, T ise maksimum iterasyon sayısını göstermektedir. Söz konusu bu fonksiyon, itme veya çekme bölgelerinin düzenlenmesi için kullanılır.

$$\eta(t) = \alpha \left(1 - \frac{t-1}{T} \right)^3 e^{-\frac{20t}{T}} \quad (3)$$

Eşitlik (2)'de verilen $h_{ij}(t)$ terimi, (4) numaralı bağıntı ile ifade edilmekte olup; ilgili eşitlikteki r , iki atom arasındaki mesafeyi, h_{min} alt sınırı, h_{max} ise üst sınırı temsil etmektedir.

$$h_{ij}(t) = \begin{cases} h_{min}, & \frac{r_{ij}(t)}{\sigma(t)} < h_{min} \\ \frac{r_{ij}(t)}{\sigma(t)}, & h_{min} \leq \frac{r_{ij}(t)}{\sigma(t)} \leq h_{max} \\ h_{max}, & \frac{r_{ij}(t)}{\sigma(t)} > h_{max} \end{cases} \quad (4)$$

Son eşitlikte verilen bu fonksiyon, itme, çekme veya dengenin oluşmasına yardımcı olur. Keşif özelliği alt itme ($h = 1.1$) ve üst çekme sınırlarına ($h = 1.24$) sahip olunca artırılmış olur. Eşitlik (5)'te verilen g_0 ve u terimlerinin sınırları sırasıyla 1.1 ve 1.24 değerlerine eşittir.

$$h_{min} = g_0 + g(t), \quad h_{max} = u \quad (5)$$

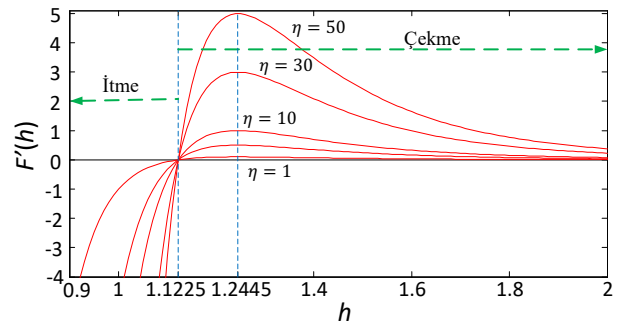
Algoritmanın keşiften sömürüye kaymasını sağlayan sürüklenme faktörü, g ile ifade edilmekte ve bağıntı (6) ile verilmektedir.

$$g(t) = 0.1 \times \sin\left(\frac{\pi}{2} \times \frac{t}{T}\right) \quad (6)$$

Eşitlik (4)'te verilen $\sigma(t)$, uzunluk ölçeğini temsil etmekte ve bağıntı (7)'de verildiği şekliyle tanımlanmaktadır.

$$\sigma(t) = \left\| x_{ij}(t), \frac{\sum_{j \in K_{best}} x_{ij}(t)}{K(t)} \right\|_2 \quad (7)$$

Burada K_{best} , en iyi uygunluk fonksiyonu değerlerini içeren ilk K atomlarının olduğu bir popülasyonunu belirtir. F' fonksiyonunun $\eta(t)$ değerlerine göre davranışı (h değerlerine karşılık gelen) Şekil 1'de gösterilmektedir.



Şekil 1. Farklı η değerlerine karşılık gelen F' fonksiyonu

Diğer atomlardan dolayı d . boyutta i . atom üzerinde etkili olan rasgele ağırlıklara sahip bileşenlerin toplamı, toplam kuvvet olarak ifade edilmekte ve (8) numaralı eşitlik aracılığıyla verilmektedir.

$$F_i^d(t) = \sum_{j \in K_{best}} rand_j F_{ij}^d(t) \quad (8)$$

Eşitlik (8)'deki $rand_j$, terimi $[0,1]$ aralığında rastgele bir sayıyı temsil etmektedir. Moleküler dinamikte atomik hareket, geometrik kısıtlamadan büyük ölçüde etkilenir. ASO algoritmasında bu durum her atom ile en iyi atom arasında kovalent bir bağ varsayımı ile basitleştirilmektedir. Böylelikle, i . Atomun kısıtlanması (9) bağıntısı ile verilen halde yazılabilir.

$$\theta_i(t) = [|x_i(t) - x_{best}(t)|^2 - (b_{i,best})^2] \quad (9)$$

İlgili eşitlikte $x_{best}(t)$, t iterasyonundaki en iyi atom pozisyonunu temsil ederken, $b_{i,best}$ en iyi atom ile i . atom arasındaki sabit bağ uzunluğunu göstermektedir. Böylece, kısıtlama kuvveti eşitlik (10)'da verildiği haliyle elde edilebilir.

$$G_i^d(t) = \lambda(t) (x_{best}^d(t) - x_i^d(t)) \quad (10)$$

Burada, $\lambda(t)$ Langrajyan çarpanıdır ve eşitlik (11)'de olduğu gibi tanımlanır.

$$\lambda(t) = \beta e^{-\frac{20t}{T}} \quad (11)$$

Bağıntı (11)'deki verilen β , çarpan ağırlığını ifade etmektedir. i atomunun t anındaki ivmesi eşitlik (12)'deki gibi yazılabilir.

$$a_i^d(t) = \frac{F_i^d(t)}{m_i^d(t)} + \frac{G_i^d(t)}{m_i^d(t)} \quad (12)$$

Burada $m_i(t)$, t anındaki i atomunun kütesidir. Söz konusu son denklemden de görüleceği üzere, daha büyük kütleli bir atom daha iyi bir fonksiyon uygunluk değeri sağlamakta ve böylece daha az ivmeye neden olmaktadır. i atomunun kütesi eşitlik (13)'te verilen ifade ile hesaplanabilmektedir.

$$m_i(t) = \frac{M_i(t)}{\sum_{j=1}^N M_j(t)} \quad (13)$$

$$M_i(t) = e^{-\frac{Fit_i(t) - Fit_{best}(t)}{Fit_{worst}(t) - Fit_{best}(t)}} \quad (14)$$

$Fit_{best}(t)$ ve $Fit_{worst}(t)$ sırası ile t iterasyonundaki minimum ve maksimum uygunluk değerlerine sahip atomları temsil etmektedirler. Söz konusu bu uygunluk değerleri de eşitlik (15) ve (16) ile verilmektedir.

$$Fit_{best}(t) = \min_{i \in \{1,2,\dots,N\}} Fit_i(t) \quad (15)$$

$$Fit_{worst}(t) = \max_{i \in \{1,2,\dots,N\}} Fit_i(t) \quad (16)$$

Algoritmayı basitleştirmek adına $t+1$ iterasyonundaki i atomunun hızı ve konumu aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$v_i^d(t+1) = rand^d v_i^d(t) + a_i^d(t) \quad (17)$$

$$x_i^d(t+1) = x_i^d(t) + v_i^d(t+1) \quad (18)$$

Daha iyi bir keşfi yeteneği için her atom daha iyi uygunluk değerine sahip K komşu atomları ile mümkün olduğunca fazlaca etkileşim içinde olmalıdır. Bahsedilen durumun aksine, sömürü yeteneğinin iyileştirilmesi için her atom daha iyi uygunluk

değerine sahip K komşu atomları ile mümkün olduğunca daha az etkileşim içinde olmalıdır. Burada bahsi geçen K , zamana bağlı bir fonksiyonu temsil eder ve iterasyon sayısına göre kademeli düşüşü göstermek için eşitlik (19)'da olduğu gibi hesaplanır.

$$K(t) = N - (N - 2) \times \sqrt{\frac{t}{T}} \quad (19)$$

3. SA Tekniği

Bu algoritma, metalürjideki tavlama sürecini taklit ederek çözüm üreten bir yöntemdir [26]. Algoritma süreci, temel olarak ısıtma ve soğutma aşamaları aracılığı ile daha az kusurlu tek tip kristal üretilme işleminin simüle edilmiş halinden ibarettir [27]. SA, X_i çözümü için rastgele bir başlangıç değer kümesiyle başlar ve bunun aracılığıyla X'_i komşu çözümünü belirler. Ardından, X_i ve X'_i için uygunluk değerini hesaplar. X'_i çözümüne ait olan $F(X'_i)$ uygunluk değerinin, X_i çözümünün $F(X_i)$ uygunluk değerinden küçük olması durumunda SA tarafından $X_i = X'_i$ şeklinde bir ayarlama yapılmaktadır. Bununla beraber, bahsedilen bu ilişki olmasa bile, SA algoritması X_i çözümünü X'_i çözümü ile değiştirme yoluna yine de gidebilir. Böyle bir durumun gerçekleştirilmesi, eşitlik (20)'de tanımlanan p olasılığına bağlıdır.

$$p = e^{-\frac{\Delta F}{T_k}}; \Delta F = F(X'_i) - F(X_i) \quad (20)$$

Burada F uygunluk fonksiyonunu, T ise sıcaklık kontrol parametresini ifade etmektedir. SA algoritması X_i çözümünü, $p < rand(0,1)$ durumunda X'_i çözümü ile değiştirmeyecektir. Bir sonraki aşamada aşağıdaki denklemleri kullanarak sıcaklık değerini azaltmaktadır.

$$T_{k+1} = \mu T_k \quad (21)$$

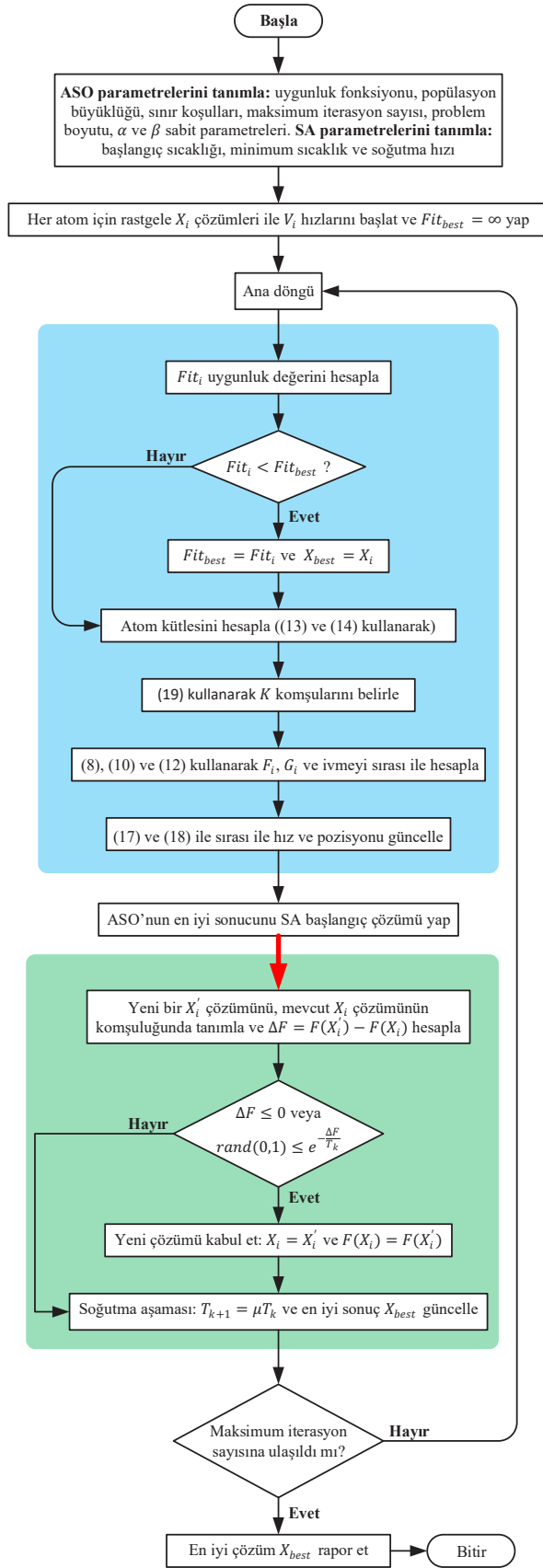
Burada μ , 0 ile 1 arasında rastgele değişen soğutma katsayısını ifade etmektedir.

4. Önerilen Geliştirilmiş Algoritma

Giriş bölümünde bahsedildiği üzere, ASO algoritmasının orijinal versiyonu, çeşitli mühendislik problemlerini çözmeye başarı sergilemiştir. Ancak, diğer küresel optimizasyon tekniklerinin birçoğunda olduğu gibi, bu algoritma da büyük boyutlu sorunlara çözümler sağlamak için yeterince verimli değildir. Bu sorunun üstesinden gelip ASO algoritmasının etkinliğini artırmak için bu çalışmada SA tekniği ASO algoritması ile hibritleştirilerek yeni bir yaklaşım elde edilmiştir.

SA algoritmasının temel faydalarından biri, tepe tırmanma hareketleri ile yerel minimumdan kaçma yeteneğidir. Söz konusu bu durum global bir çözüm arama açısından yararlıdır. Bu algoritma, mevcut çözümü daha iyi olan komşu çözüme doğru kaydırarak arama alanının keşfedilmesi sağlar. Bu yapısı ile de ASO algoritmasının yerel minimuma takılmamasına yardımcı olmaktadır.

Bu çalışma ile MLP eğitimi için önerilen yeni hibrit iASO algoritması, ASO algoritmasının hızlı keşif ve SA algoritmasının da tepe tırmanma özelliğini kullanmaktadır. Önerilen hibrit algoritmanın akış şeması Şekil 2'de gösterilmektedir. İlgili diyagramdan da görülebileceği gibi önerilen hibrit algoritma, ASO ve SA algoritmalarının parametrelerinin başlatılması ve uygunluk değerlerinin sonsuza ayarlanması ile rastgele bir atom kümesi üzerinden başlatılmaktadır.



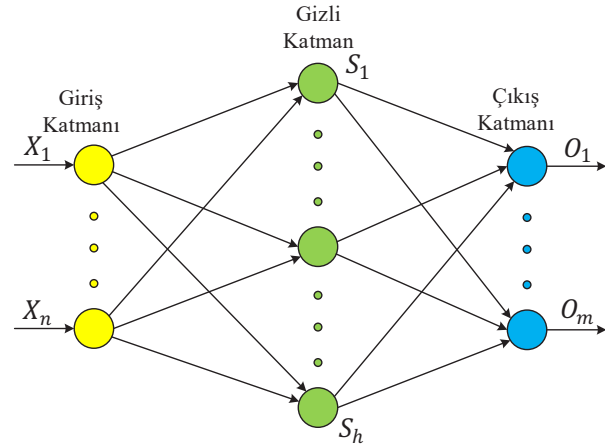
Şekil 2. Önerilen algoritmanın akış şeması

Söz konusu parametreler elde edildikten sonra, iterasyonlar boyunca her bir atom için uygunluk değeri hesaplanır ve ardından elde edilen uygunluk değeri en iyi uygunluk değeri ile karşılaştırılır. Daha iyi değerler olması durumunda, algoritma en iyi çözümü ve uygunluk değerini günceller ve akış şemasındaki adımların geri kalanı yürütülür. Her bir yinelemede, ASO algoritmasının ilgili iterasyon için elde ettiği en iyi çözüm, SA algoritmasının başlangıç çözümü olarak alınmaktadır. Bu yolla ASO algoritmasının arama alanını keşfetme yeteneği artırılmaktadır.

5. Önerilen Algoritma ile MLP Eğitimi

5.1. Çok Katmanlı Algılayıcı

MLP, veri geçişinin gerçekleştiği katmanlı bir yapıya sahip olan ve nöronlar tek yönlü olarak düzenlendiği ileri beslemeli bir sinir ağı olarak tanımlanabilir [28]. Giriş katmanı, gizli katman ve çıkış katmanı olarak adlandırılan paralel katmanlar MLP'lerin yapısını meydana getirmektedir. Şekil 3, bu üç katmana sahip bir MLP'yi göstermektedir. İlgili şekilde n giriş düğümleri sayısını, h gizli katmanı ve m 'de çıkış düğümlerini ifade etmektedir.



Şekil 3. MLP sinir ağının yapısı

MLP çıkışı birkaç adımda hesaplanmaktadır. İlk olarak, ağırlıklı toplamlar eşitlik (22) kullanılarak hesaplanır.

$$s_j = \sum_{i=1}^n (W_{ij}X_i) - \theta_j, j = 1, 2, \dots, h \quad (22)$$

Bu eşitlikte, W_{ij} , giriş katmanının i . düğümünden gizli katmanın j . düğümüne olan bağlantı ağırlığı; X_i , i . girişi; θ_j ise j . gizli katmana ait bias değerini temsil etmektedir. İkinci olarak, her gizli düğümün çıktısı eşitlik (23)'te olduğu gibi hesaplanır.

$$S_j = \text{sigmoid}(s_j) = \frac{1}{1 + e^{-s_j}}, j = 1, 2, \dots, h \quad (23)$$

Gizli düğümlerin çıktıları hesaplandıktan sonra, son çıkışlar eşitlik (24) ve (25)'te olduğu gibi tanımlanır.

$$o_k = \sum_{j=1}^h (\omega_{jk}S_j) - \theta'_k, \quad (24)$$

$$O_k = \text{sigmoid}(o_k) = \frac{1}{1 + e^{-o_k}}, \quad (25)$$

Son iki denklemde $k = 1, 2, \dots, m$ olarak ifade edilmektedir. ω_{jk} , gizli düğüm j 'den çıkış düğümü k 'ya olan bağlantı ağırlığını temsil etmektedir.

MLP'nin nihai çıkışının kalitesi bias değeri ve bağlantı ağırlıklarına bağlı olduğundan bu iki parametre MLP eğitiminde kritik bir rol oynamaktadır. Bu nedenle, bir MLP eğitimi bu parametreler için optimum değerleri bulmak anlamına gelmektedir.

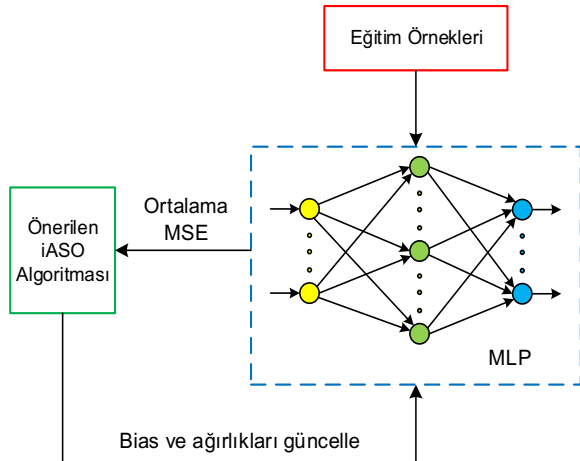
5.2. Önerilen Algoritma Tabanlı MLP Eğiticisi

Sezgisel-üstü algoritmalar kullanarak üç farklı yöntem ile MLP'leri eğitmek mümkündür. İlk yöntem, optimum bağlantı ağırlıklarını ve bias değerlerini bulmak ile ilgilidir. Bu yolla MLP için sezgisel-üstü yöntemler aracılığı ile minimum hatanın elde edilmesi sağlanır. Bahsi geçen bu yöntemde MLP mimarisi öğrenme sürecinde olduğu gibi kalır. İkinci yöntem ise spesifik bir problem durumunda sezgisel-üstü algoritmaları kullanarak MLP için uygun bir mimari yapı bulmakla ilgilidir. Sezgisel-üstü algoritmaların kullanılabileceği sonucu yaklaşım ise gradyan tabanlı öğrenme algoritmasının öğrenme hızı ve momentum gibi parametrelerinin ayarlanması olayıdır.

Önerilen iASO algoritması için yukarıda açıklanan ilk yöntem uygulanmıştır. Çünkü öğrenme algoritması için uygun bias ve ağırlıkların elde edilerek MLP hatasının en aza indirilmesi gerekmektedir. MLP eğitiminde söz konusu bu iki parametrenin temsili önemli bir özelliktir. Bunları temsil etmek için ise binary, matris ve vektör gibi üç yöntem mevcuttur [29]. Bu makalede, bias ve ağırlıkların temsili için vektör yöntemi kullanılmıştır. Bias ve ağırlıkların vektör biçiminde temsil edilmesinden sonra algoritmanın her bir aday çözümünü değerlendirmek üzere amaç fonksiyonu tanımlanmalıdır. Bu çalışmada, eşitlik (26) ile verilen MSE amaç fonksiyonu olarak belirlenmiştir.

$$E = \sum_{k=1}^q \frac{\sum_{i=1}^m (o_i^k - d_i^k)^2}{q} \quad (26)$$

Burada, m çıkışların sayısını, q ise eğitim örneklerinin sayısını ifade etmektedir. d_i^k , k . eğitim örneği kullanıldığında i . giriş biriminin istenen çıkışı ifade ediyor iken o_i^k , söz konusu bu eğitim örneği girişte kullanılıyor iken elde edilen gerçek çıkıştır.



Şekil 4. iASO tabanlı MLP eğiticisi

Şekil 4, önerilen hibrit iASO algoritmasını kullanan MLP eğitiminin genel sürecini göstermektedir. Şekilden de görüldüğü gibi, iASO algoritması MLP'ye bias ve ağırlıkları sağlamakta ve tüm eğitim örnekleri için ortalama MSE değerini almaktadır. iASO algoritması, tüm eğitim örneklerinin ortalama kare hatasını en aza indirmek için bias ve ağırlıkları iteratif olarak değiştirir.

6. İzlenen Yöntem ve Sonuçlar

XOR, Balloon, Iris, Heart ve Breast Cancer olmak üzere beş adet sınıflandırma veri kümesi önerilen iASO algoritmasını kıyaslamak için kullanılmıştır. Bu veri kümeleri kaynak [24]'den elde edilmiştir. Her bir aday çözüm, eğitim algoritmasında $[-10, 10]^D$ aralığından rastgele seçilmiştir. Sınıflandırma problemleri için maksimum iterasyon sayısı 250 ayarlanıp aday çözümlerin popülasyon büyüklüğü Iris, Heart ve Breast Cancer veri kümeleri için 200 alınırken, XOR ve Balloon veri kümeleri için ise 50 olarak seçilmiştir. Veri kümeleri Tablo 1'de sunulduğu gibi sınıflandırılmıştır. Tablo 1'de gösterilen veri kümelerinin farklı zorluk seviyeleri bulunmaktadır. Örneğin, Heart veri kümesi zor olarak değerlendirilirken, XOR veri kümesi basittir.

Tablo 1. Sınıflandırma veri kümeleri

Veri Kümeleri	Özelliklerin Sayısı	Eğitim Örneklerinin Sayısı	Test Örneklerinin Sayısı	Sınıf Sayısı
XOR	3	8	8	2
Balloon	4	16	16	2
Iris	4	150	150	3
Breast cancer	9	599	100	2
Heart	22	80	187	2

Önerilen algoritma, veri kümelerine 30 kez uygulanmış olup elde edilen sonuçlar Tablo 2'den Tablo 6'ya kadar verilmiştir. Bu sonuçlar, algoritmanın son iterasyonunda elde edilen en iyi MSE değerinin ortalamasını ve standart sapmasından oluşmaktadır. Son yinelemede MSE'nin daha düşük ortalama ve standart sapması daha iyi bir performansın göstergesidir. Önerilen iASO algoritmasının performansı, söz konusu verilen sınıflandırma problemlerini çözmek için kullanılan orijinal ASO, SCA [3], GWO [30], PSO [30], ACO [30] ve GA [30] algoritmaları ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Çok sayıda eğitim örneği problemin zorluğunu azaltırken, çok sayıda özellik sınır ağının daha büyük boyuta sahip olmasına neden olmakta, dolayısıyla, daha fazla ağırlık belirlenmesini gerektirmektedir ve bu sebepten problemin zorluğunu arttırmaktadır. Dikkate alınan veri kümeleri ve elde edilen sonuçları devam eden paragraflarda açıklanmaktadır.

Kullanılan veri kümelerinden olan XOR, iyi bilinen ve doğrusal olmayan bir sınıflandırma problemidir. Giriş vektöründeki 1'lerin sayısını tanımlamak bu problemin amacıdır. Giriş vektörünü oluşturan 1'lerin tek sayıda olması durumunda çıkış 1 iken; çift sayıda olması durumunda 0'dır. Bu sorunu çözmek için 3-7-1 yapısına sahip MLP kullanıldı. Bu veri kümesi için elde edilen sonuçlar Tablo 2'de sunulmuştur. Önerilen algoritma performansının söz konusu bu problemi çözmeye daha iyi olduğu açıkça gösterilmektedir.

Diğer bir veri kümesi olan Balloon veri seti, string formatında olan renk, yaş, hareket ve boyut gibi 4 özelliğe sahip 16 örnek

içerir. Bu veri kümesinin sınıflandırılması için 4-9-1'lik bir MLP yapısı kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar Tablo 3'te sunulmuş olup, GA algoritmasının önerilen algoritmadan daha iyi bir performans sergileyerek minimum hatayı sağladığı görülmüştür ancak önerilen algoritmanın bu noktada performansı diğer tüm algoritmalarından daha iyi olmuştur. Karşılaştırmada kullanılan tüm algoritmaların sınıflandırma oranları aynı ve %100 olmuştur. Önerilen algoritma sadece Ballon veri seti için GA algoritmasının gerisinde bir performans sergilemiştir ancak ilerleyen paragraflarda da bahsedildiği üzere geri kalan diğer tüm veri setlerinde en iyi sonuçların elde edilmesini sağlamıştır.

Tablo 2. XOR sınıflandırma problemi için deneysel sonuçlar

Eğitim Algoritması	Ortalama	Standart Sapma	Sınıflandırma (%)
iASO-MLP (önerilen)	3.78E-06	7.03E-08	100.00
ASO-MLP	6.38E-03	1.92E-02	100.00
SCA-MLP [3]	3.52E-02	2.69E-02	87.50
GWO-MLP [30]	9.41E-03	2.95E-02	100.00
PSO-MLP [30]	8.40E-02	3.59E-02	37.50
GA-MLP [30]	1.81E-04	4.13E-04	100
ACO-MLP [30]	1.80E-01	2.53E-02	62.50

Üçüncü veri kümesi olarak kullanılan Iris veri seti, Virginica, Versicolor ve Setosa olmak üzere üç sınıf altında değerlendirilebilecek 150 örnek içermektedir. Taç yaprak uzunluğu ve genişliği ile çanak yaprak genişliği ve uzunluğu bu örneklerde bulunan dört özelliklerdir. Bu sınıflandırma probleminin çözümü için 4-9-3 yapısına sahip bir MLP kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar Tablo 4'te verilmiştir. Bu tablodan da görüleceği üzere yapılan karşılaştırmalar sonucu önerilen algoritmanın, MSE amaç fonksiyonu ve sınıflandırma oranı değerlerine dayalı olarak MLP'yi eğitmek üzere daha iyi performans göstererek diğer algoritmalarından üstün olduğu anlaşılmaktadır.

Tablo 3. Balloon sınıflandırma problemi için deneysel sonuçlar

Eğitim Algoritması	Ortalama	Standart Sapma	Sınıflandırma (%)
iASO-MLP (önerilen)	8.18E-16	2.71E-15	100.00
ASO-MLP	3.47E-08	1.52E-07	100.00
SCA-MLP [3]	7.35E-06	1.04E-05	100.00
GWO-MLP [30]	9.38E-15	2.81E-14	100.00
PSO-MLP [30]	5.85E-04	7.49E-04	100.00
GA-MLP [30]	5.08E-24	1.06E-23	100.00
ACO-MLP [30]	4.85E-03	7.76E-03	100.00

Bir diğer veri kümesi olan Breast Cancer veri seti 9 özellik ve 699 örnekten oluşur. Marjinal yapıya ve yığın kalınlığı ile hücre şekli ve boyutu bu veri setinin özelliklerindedir. İyi huylu kanser için çıkış 2 iken kötü huylu kanser için 4'tür. Bu sınıflandırma probleminin çözümü için 9-19-1 yapısına sahip MLP kullanılmıştır. Tablo 5 ile bu problemin sonuçlarını verilmektedir. Tablodan da görüldüğü üzere, önerilen algoritma

vasıtasıyla MSE amaç fonksiyonunun ortalama ve standart sapması en düşük değerini almıştır ve en yüksek sınıflandırma oranı sağlanmıştır. Bu da önerilen algoritmanın daha iyi performansa sahip olduğunun açık bir göstergesidir.

Bu çalışma için kullanılan sonuncu veri kümesini Heart veri seti oluşturmaktadır. Bu veri seti 267 kardiyak tomografi görüntüsünü içermektedir. Bu görüntüleri özetlemek üzere 22 özellik çıkarılmıştır. 22-45-1 yapısına sahip MLP, 80 örnek kullanılarak eğitilmiştir. Bir hastanın durumu, veri setinin binary formu kullanılarak normal veya normal değil olarak ifade edilmektedir. Tablo 6 sonuçları listelemekte ve önerilen algoritmanın diğerlerinden daha iyi sonuçlar ve sınıflandırma oranı sağlayabileceğini açıkça göstermektedir.

Tablo 4. Iris sınıflandırma problemi için deneysel sonuçlar

Eğitim Algoritması	Ortalama	Standart Sapma	Sınıflandırma (%)
iASO-MLP (önerilen)	1.51E-02	2.35E-03	91.33
ASO-MLP	1.64E-02	3.17E-03	89.33
SCA-MLP [3]	1.35E-01	3.68E-02	54.67
GWO-MLP [30]	2.29E-02	3.20E-03	91.33
PSO-MLP [30]	2.29E-01	5.72E-02	37.33
GA-MLP [30]	8.99E-02	1.24E-01	89.33
ACO-MLP [30]	4.06E-01	5.38E-02	32.66

Tablo 5. Breast Cancer sınıflandırma problemi için deneysel sonuçlar

Eğitim Algoritması	Ortalama	Standart Sapma	Sınıflandırma (%)
iASO-MLP (önerilen)	1.08E-03	9.21E-05	100.00
ASO-MLP	3.62E-03	1.88E-03	99.00
SCA-MLP [3]	1.15E-02	5.36E-03	97.00
GWO-MLP [30]	1.20E-03	7.45E-05	99.00
PSO-MLP [30]	3.49E-02	2.47E-03	11.00
GA-MLP [30]	3.03E-03	1.50E-03	98.00
ACO-MLP [30]	1.35E-02	2.14E-03	40.00

Tablo 6. Heart sınıflandırma problemi için deneysel sonuçlar

Eğitim Algoritması	Ortalama	Standart Sapma	Sınıflandırma (%)
iASO-MLP (önerilen)	7.48E-02	4.27E-03	76.25
ASO-MLP	9.64E-02	1.52E-02	73.75
SCA-MLP [3]	1.79E-01	1.28E-02	64.17
GWO-MLP [30]	1.23E-01	7.70E-03	75.00
PSO-MLP [30]	1.89E-01	8.94E-03	68.75
GA-MLP [30]	9.30E-02	2.25E-02	58.75
ACO-MLP [30]	2.28E-01	4.98E-03	00.00

7. Sonuç

Bu çalışmada, orijinal ASO algoritması ile SA tekniği hibritleştirilerek iASO adı verilen yeni bir hibrit algoritma

geliştirilmiştir. Önerilen iASO algoritması MLP eğitiminde kullanılarak performansı değerlendirilmiştir. MLP eğitimi ise XOR, Balloon, Breast Cancer, Iris ve Heart veri kümeleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, klasik ASO, SCA, GWO, PSO, ACO ve GA gibi algoritmaların kullanımıyla gerçekleştirilen eğitimcilerin performansları önerilen iASO tabanlı MLP eğitimcisi ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Önerilen algoritma sadece Balloon veri seti için GA algoritmasının gerisinde bir performans sergilemiş olup söz konusu bu veri seti için GA dışındaki diğer karşılaştırılan algoritmalara göre daha iyi olduğu gözlemlenmiştir. Diğer tüm veri setleri için önerilen iASO'nun, diğer tekniklerle kıyaslandığında MSE ortalaması ve standart sapması ile yüzdelik sınıflandırma oranı açısından etkin olduğu gözlemlenmiştir.

Kaynaklar

- [1] P. Bansal, S. Kumar, S. Pasrija, and S. Singh, "A hybrid grasshopper and new cat swarm optimization algorithm for feature selection and optimization of multi-layer perceptron," *Soft Comput.*, pp. 1–27, 2020, doi: 10.1007/s00500-020-04877-w.
- [2] S. Haykin, *Neural networks: A comprehensive foundation*, 2nd editio. Prentice Hall PTR, 1999.
- [3] S. Gupta and K. Deep, "A novel hybrid sine cosine algorithm for global optimization and its application to train multilayer perceptrons," *Appl. Intell.*, vol. 50, no. 4, pp. 993–1026, 2020, doi: 10.1007/s10489-019-01570-w.
- [4] A. A. Suratgar, M. B. Tavakoli, and A. Hoseinabadi, "Modified Levenberg-Marquardt method for neural networks training," *World Acad Sci Eng Technol*, vol. 6, no. 1, pp. 46–48, 2005.
- [5] E. Eker, M. Kayri, S. Ekinici, and D. İzci, "Training Multi-Layer Perceptron Using Harris Hawks Optimization," in *2020 International Congress on Human-Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications (HORA)*, 2020, pp. 1–5, doi: 10.1109/HORA49412.2020.9152874.
- [6] H. Faris, S. Mirjalili, and I. Aljarah, "Automatic selection of hidden neurons and weights in neural networks using grey wolf optimizer based on a hybrid encoding scheme," *Int. J. Mach. Learn. Cybern.*, vol. 10, no. 10, pp. 2901–2920, 2019, doi: 10.1007/s13042-018-00913-2.
- [7] A. A. Heidari, H. Faris, S. Mirjalili, I. Aljarah, and M. Mafarja, "Ant lion optimizer: Theory, literature review, and application in multi-layer perceptron neural networks," in *Studies in Computational Intelligence*, vol. 811, S. Mirjalili, J. Song Dong, and A. Lewis, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2020, pp. 23–46.
- [8] M. Khishe and M. R. Mosavi, "Classification of underwater acoustical dataset using neural network trained by Chimp Optimization Algorithm," *Appl. Acoust.*, vol. 157, p. 107005, 2020, doi: 10.1016/j.apacoust.2019.107005.
- [9] A. A. Heidari, H. Faris, I. Aljarah, and S. Mirjalili, "An efficient hybrid multilayer perceptron neural network with grasshopper optimization," *Soft Comput.*, vol. 23, no. 17, pp. 7941–7958, 2019, doi: 10.1007/s00500-018-3424-2.
- [10] M. Khishe and H. Mohammadi, "Passive sonar target classification using multi-layer perceptron trained by salp swarm algorithm," *Ocean Eng.*, vol. 181, pp. 98–108, 2019, doi: 10.1016/j.oceaneng.2019.04.013.
- [11] D. Bairathi and D. Gopalani, "Numerical optimization and feed-forward neural networks training using an improved optimization algorithm: multiple leader salp swarm algorithm," *Evol. Intell.*, pp. 1–17, 2019, doi: 10.1007/s12065-019-00269-8.
- [12] Y. Yin, Q. Tu, and X. Chen, "Enhanced Salp Swarm Algorithm based on random walk and its application to training feedforward neural networks," *Soft Comput.*, vol. 24, no. 19, pp. 14791–14807, 2020, doi: 10.1007/s00500-020-04832-9.
- [13] R. García-Ródenas, L. J. Linares, and J. A. López-Gómez, "Memetic algorithms for training feedforward neural networks: an approach based on gravitational search algorithm," *Neural Comput. Appl.*, 2020, doi: 10.1007/s00521-020-05131-y.
- [14] S. Mirjalili and A. S. Sadiq, "Magnetic Optimization Algorithm for training Multi Layer Perceptron," in *2011 IEEE 3rd International Conference on Communication Software and Networks*, 2011, pp. 42–46, doi: 10.1109/ICCSN.2011.6014845.
- [15] B. Turkoglu and E. Kaya, "Training multi-layer perceptron with artificial algae algorithm," *Eng. Sci. Technol. an Int. J.*, 2020, doi: 10.1016/j.jestch.2020.07.001.
- [16] A. C. Cinar, "Training Feed-Forward Multi-Layer Perceptron Artificial Neural Networks with a Tree-Seed Algorithm," *Arab. J. Sci. Eng.*, 2020, doi: 10.1007/s13369-020-04872-1.
- [17] W. Zhao, L. Wang, and Z. Zhang, "Atom search optimization and its application to solve a hydrogeologic parameter estimation problem," *Knowledge-Based Syst.*, vol. 163, pp. 283–304, 2019, doi: 10.1016/j.knsys.2018.08.030.
- [18] P. Sun, Y. Zhang, J. Liu, and J. Bi, "An Improved Atom Search Optimization with Cellular Automata, a Lévy Flight and an Adaptive Weight Strategy," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 49137–49159, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2979921.
- [19] P. Sun, H. Liu, Y. Zhang, L. Tu, and Q. Meng, "An intensify atom search optimization for engineering design problems," *Appl. Math. Model.*, vol. 89, pp. 837–859, 2021, doi: 10.1016/j.apm.2020.07.052.
- [20] B. Hekimoğlu, "Optimal Tuning of Fractional Order PID Controller for DC Motor Speed Control via Chaotic Atom Search Optimization Algorithm," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 38100–38114, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2905961.
- [21] S. Ekinici, A. Demiroren, H. Zeynelgil, and B. Hekimoğlu, "An opposition-based atom search optimization algorithm for automatic voltage regulator system," *J. Fac. Eng. Archit. Gazi Univ.*, vol. 35, pp. 1141–1158, Apr. 2020, doi: 10.17341/gazimmfd.598576.
- [22] X. Pan, L. Xue, Y. Lu, and N. Sun, "Hybrid particle swarm optimization with simulated annealing," *Multimed. Tools Appl.*, vol. 78, no. 21, pp. 29921–29936, 2019, doi: 10.1007/s11042-018-6602-4.
- [23] F. Javidrad and M. Nazari, "A new hybrid particle swarm and simulated annealing stochastic optimization method," *Appl. Soft Comput. J.*, vol. 60, pp. 634–654, 2017, doi: 10.1016/j.asoc.2017.07.023.
- [24] C. L. Blake and C. J. Merz, "UCI Repository of machine learning databases," *University of California*, 1998. <http://archive.ics.uci.edu/ml/>.
- [25] W. Zhao, L. Wang, and Z. Zhang, "A novel atom search optimization for dispersion coefficient estimation in groundwater," *Futur. Gener. Comput. Syst.*, vol. 91, pp. 601–610, 2019, doi: 10.1016/j.future.2018.05.037.
- [26] S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt, and M. P. Vecchi,

- “Optimization by simulated annealing,” *Science (80-.)*, vol. 220, no. 4598, pp. 671–680, 1983, doi: 10.1126/science.220.4598.671.
- [27] B. Hekimoğlu and S. Ekinçi, “Optimally designed PID controller for a DC-DC buck converter via a hybrid whale optimization algorithm with simulated annealing,” *Electrica*, vol. 20, no. 1, pp. 19–27, 2020, doi: 10.5152/ELECTRICA.2020.19034.
- [28] T. Şengüler, E. Karatoprak, and S. Şeker, “A new MLP approach for the detection of the incipient bearing damage,” *Adv. Electr. Comput. Eng.*, vol. 10, no. 3, pp. 34–39, 2010, doi: 10.4316/aecce.2010.03006.
- [29] J. R. Zhang, J. Zhang, T. M. Lok, and M. R. Lyu, “A hybrid particle swarm optimization-back-propagation algorithm for feedforward neural network training,” *Appl. Math. Comput.*, vol. 185, no. 2, pp. 1026–1037, 2007, doi: 10.1016/j.amc.2006.07.025.
- [30] S. Mirjalili, “How effective is the Grey Wolf optimizer in training multi-layer perceptrons,” *Appl. Intell.*, vol. 43, no. 1, pp. 150–161, 2015, doi: 10.1007/s10489-014-0645-7.

Davut İZCİ



Davut İZCİ, lisans derecesini Dicle Üniversitesi Elektrik - Elektronik Mühendisliği Bölümü'nden, yüksek lisans ve doktora derecelerini ise İngiltere'de bulunan Newcastle Üniversitesi'nden (University of Newcastle upon Tyne) sırası ile mekatronik ve mikrosistemler alanlarından almıştır. Şuan da Batman Üniversitesi Elektronik ve Otomasyon Bölümü'nde Dr. Öğretim Üyesi olarak çalışmaktadır. Dr. İZCİ'nin araştırma alanları mikrosistemler, sensörler ve algılama uygulamaları, robotik, kontrol ve uygulamaları ile optimizasyon algoritmalarıdır.

Ters-Paralel Bağlı Schottky Diyot Dizisi Tabanlı Van der Pol Osilatörü Devresinin Modellenmesi ve LTspice ve Simulink Kullanarak Analizi

Modeling an Anti-Parallel-Connected Schottky Diode String-Based Van der Pol Oscillator Circuit and its Analysis Using LTspice and Simulink

Kübra Çakır^{1*}, Reşat Mutlu¹, Ertuğrul Karakulak²



¹Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği, Çorlu Mühendislik Fakültesi, Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Çorlu, Tekirdağ, Türkiye

²Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu, Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Tekirdağ, Türkiye

*1218123101@nku.edu.tr
rmutlu@nku.edu.tr
ekarakulak@nku.edu.tr

Öz

Van der Pol Osilatörü 1926 yılında, Philips'te çalışan elektrik mühendisi ve fizikçi Dr. Balthasar Van der Pol tarafından keşfedilmiştir. Bu osilatör çeşidinin oldukça zengin dinamikleri mevcuttur. İlk yapılan Van der Pol Osilatörü'nde bir triyot kullanılmıştır. Günümüzde Van der Pol Osilatörü, farklı yarı iletken elemanları kullanılarak yapılabilmektedir. Bu çalışmada, nonlinear devre elemanı olarak Schottky diyotlar kullanılmıştır. Bir endüktör, bir kondansatör, ters-paralel bağlı Schottky diyot dizisi ve paralel bağlanmış negatif direnç devresinden oluşan bu yeni Van der Pol Osilatörü'nün devre denklemleri türetilmiş ve benzetimi yapılarak incelenmiştir. Benzetimlerde devrenin sınır döngüsü, devre elemanlarının akımları ve devrenin gerilimi LTspice devre analizi programı ve Matlab'in Simulink paket programı kullanılarak elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Nonlinear Osilatörler, Van der Pol Osilatörü, Schottky Diyot, Sınır Döngüsü, Devre Dinamikleri, Devre Modellemesi.

Abstract

The Van der Pol Oscillator was discovered in 1926 by electrical engineer and physicist Dr. Balthasar Van der Pol. This oscillator type has very rich dynamics. A triode is used in the original Van der Pol Oscillator. Nowadays, a Van der Pol Oscillator can be made using different semiconductor circuit elements. In this study, Schottky diodes are used as the nonlinear circuit elements. The circuit equations of the new Van der Pol Oscillator which consists of an inductor, a capacitor, anti-parallel connected Schottky diode strings, and a negative resistor circuit connected in parallel are derived and it is examined using simulations. The limit cycle of the circuit, the currents of the circuit elements and the voltage of the circuit were obtained using LTspice circuit analysis program and Simulink toolbox of Matlab.

Keywords: Nonlinear Oscillators, Van der Pol Oscillator, Schottky Diode, Limit Cycle, Circuit Dynamics, Circuit Modeling.

1. Giriş

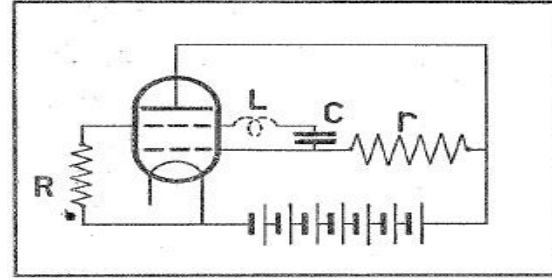
1920'li ve 1930'lu yıllarda haberleşme alanında mühendis olarak çalışan Balthasar Van der Pol'ün triyot vakum tüpleri ile yaptığı çalışmalar sonucunda artık kendi ismi ile bilinen Van der Osilatörü'nü (VDPO) bulmuştur [1-4]. Bu devreyi tanımlayan kübik nonlineerliğe sahip ikinci dereceden diferansiyel denklemler artık kendi ismi ile bilinmektedir [5-6]. Van Der Pol denklemi Liénard denkleminin özel bir hâlidir [7]. Bu devre modern salınım dinamiklerini bir çalışma sahası olarak ortaya çıkarmıştır. Bu konuda yayınlanan binlerce makale mevcuttur [8]. VDPO'nun bulunduğu zamanlarda transistör henüz bulunmamıştı ve bu yüzden triyot vakum tüpü kullanılarak yapılmıştı [9]. VDPO deterministik kaotik sistemlere bir örnektir [10]. 1962 yılında bir VDPO seri RLC devresinde nonlineer direnç olarak negatif diferansiyel direnç özelliği gösteren tünel diyot kullanılarak modellenmiştir [11]. 2008 yılında bir optik rezonans tünel diyotu kullanarak bir Liénard denklemi ile tanımlanabilen bir VDPO [12]'de teşhis edilmiştir. 2011 yılında ise tünel diyot kullanarak Van der Pol Osilatörü modellenmiş ve bu modelleme sayesinde rezonant tünelleme diyot bazlı mikrodalga kaynakları elde edilmiştir [13]. Ters-paralel bağlı diyotlu Wien Osilatörleri VDPO yaklaşımı ile çözülebilir [14]. 2018 yılında ise nonlineer kondansatör içeren bir Bonhoeffer Van der Pol Osilatörü sisteminin incelenmesi yapılmıştır [15]. [16]'da FPGA kullanılarak bir VDPO yapılmıştır. [17]'de doğrusal bir endüktör ve memristör ile VDPO devresi modellenmiş, histerezis döngüsü ve sınır döngüsü incelenmiştir. Van der Pol Osilatörü devresi günümüzde transistör, op-amp, tünel diyot, köprü diyot ve daha birçok farklı devre elemanı kullanılarak gerçekleştirilebilmektedir. Yaptığımız literatür taramasına göre henüz Schottky diyot kullanılarak yapılan bir VDPO bulunmamaktadır. Bu çalışmada ters-paralel bağlı Schottky diyot dizisi ve negatif direnç dönüştürücü kullanılarak gerekli nonlineer direnç elde edilmiş ve elde edilen bu negatif direnç, bir kondansatör ve bir endüktör bir araya getirilerek bir VDPO yapılacağı gösterilmiştir. Bu yeni osilatörün denklemleri türetilmiş ve hem LTspice hem de Simulink programlarında yapılan benzetimler ile incelenmiştir.

Bu makale şu takip eden sırayla düzenlenmiştir. İkinci bölümde bu çalışmada yapılan VDPO devresi verilmiştir. Üçüncü bölümde bu osilatörün VDPO olduğu devrenin diferansiyel denklemleri kullanılarak gösterilmiştir. Dördüncü bölümde bu VDPO devresinin LTspice ve Simulink programları ile elde edilen benzetim sonuçlarına yer verilmiştir. Beşinci bölümde çalışma sonuçları özetlenmiştir.

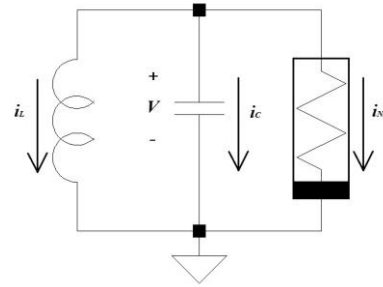
2. Ters-paralel Bağlı Schottky Diyot Dizisi Kullanan Van der Pol Osilatörü Devresi

Şekil 1'de 1926 yılındaki Van der Pol tarafından bulunan Osilatör Devresi görülebilir [2]. Bu devre birer triyot, direnç, kondansatör, endüktör ve gerilim kaynağından oluşmaktadır. Zamanla Van der Pol Osilatörü devresini gerçeklemek için triyot yerine başka elemanlar kullanılmaya başlanmıştır. Şekil 2'de jenerik bir Van der Pol Osilatörü görülebilir. Bu çizimde

genel bir nonlineer direnç kullanılmıştır. Bu nonlineer direnç çeşitli diyot türleri ve memristörler kullanılarak elde edilebilir [11, 12, 17-21]. Önemli olan VDPO sisteminin istenildiği gibi çalışmasını sağlayacak devre elemanlarının kullanılmasıdır.

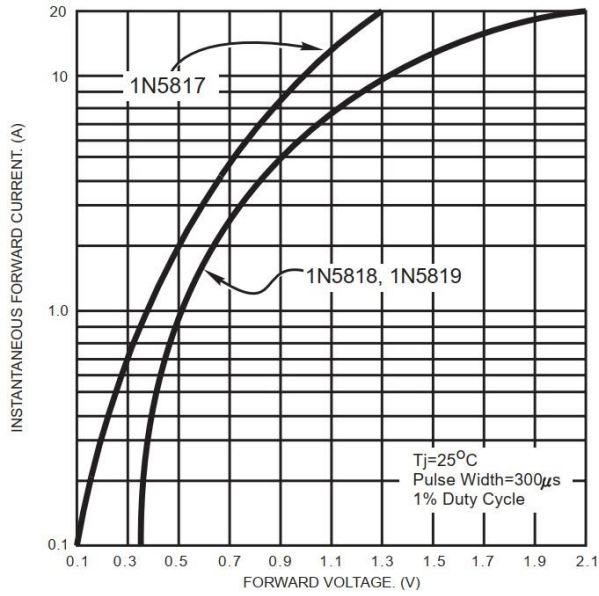


Şekil 1: 1926 yılında yapılan Van der Pol Osilatörü Devresi [2].



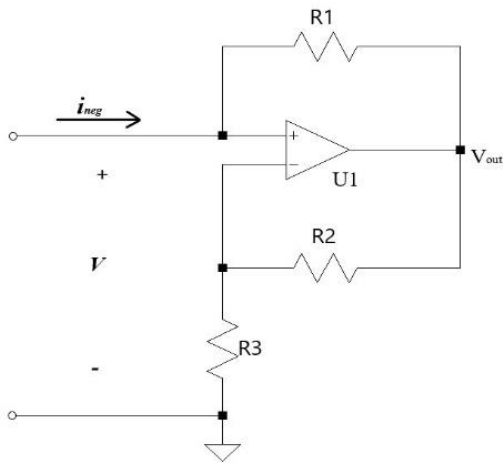
Şekil 2: Genel (Jenerik) Van der Pol Osilatörü Devresi.

Bu çalışmada Schottky diyotlar kullanılarak bir VDPO yapılacaktır. Schottky diyotların yaklaşık eşdeğer devresi ideal bir diyot ve bir kondansatörün paralel olarak bağlanmasıyla elde edilebilir [22]. Düşük frekanslarda bu kondansatörün etkisi ihmal edilebilir. Schottky diyot ve silikon diyotun içinden akım geçerken, bu 2 çeşit diyotun üzerlerine düşen gerilimler kıyaslanırsa, Schottky diyot üzerine düşen gerilim 0.15-0.45 V arasında değişirken, silikon diyot üzerine düşen gerilim 0.6-0.7 V arasında değişir [23-24]. Bu gerilim farkından dolayı Schottky diyot ile silikon diyota göre çok daha hızlı anahtarlamaya sağlanır. Bu yüzden Schottky diyotlar genellikle bilgisayar ve radyo frekans devrelerinde kullanılırlar. Ama kullanım alanları bunlarla sınırlı değildir. Yüksek hız gerektiren çok çeşitli devrelerde de yine Schottky diyot kullanılmaktadır. Örnek olarak çok hızlı Schottky diyotlar kullanılarak MHz mertebesindeki frekanslarda salınan kaotik osilatörler yapılabilir [25]. Şekil 3'te bu çalışmada kullanılan 1N5817 Schottky diyotunun $v-i$ karakteristiğine yer verilmiştir [26].

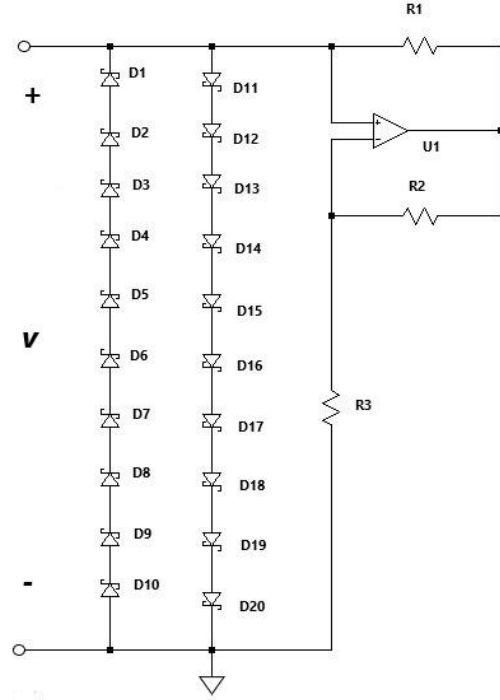


Şekil 3: 1N5817 Schottky diyotunun 25 °C'taki $v-i$ karakteristiği [26].

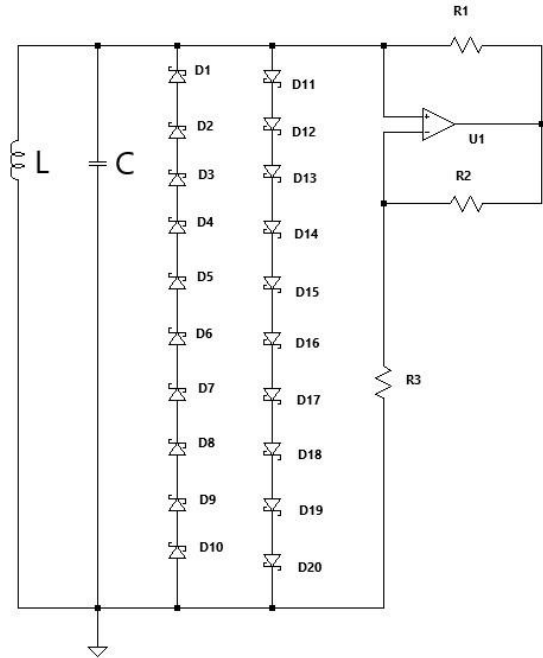
Negatif empedans ya da negatif direnç dönüştürücü negatif direnç yapımında kullanılan devrelere verilen isimdir. Bu çalışmada kullanılan op-amp tabanlı negatif direnç dönüştürücü Şekil 4'te gösterilmiştir. Ters-paralel Schottky diyot dizisi ve negatif direnç dönüştürücü devresinin paralel bağlanmasıyla elde edilen VDPO'da kullanılan negatif direnç devresi Şekil 5'te görülebilir. Çok sayıda diyotun seri olarak kullanılma nedeni Schottky diyotun eşik geriliminin düşük olmasıdır. Bu negatif direncin Şekil 2'deki jenerik VDPO'da yerine konulması ile Şekil 6'da görülen ve bu çalışmada önerilen VDPO elde edilmiş olur.



Şekil 4: VDPO Devresinde Kullanılan Negatif Direnç Dönüştürücü



Şekil 5: VDPO Devresindeki Eşdeğer Negatif Direncin Gösterimi



Şekil 6: Ters-paralel Bağlı Schottky Diyot Dizisi Kullanılarak Yapılan Paralel Van der Pol Osilatörü Devresi

3. Ters-paralel Schottky Diyot Dizisi Tabanlı Van der Pol Osilatörü'nün Devre Denklemleriyle Analizi

Liénard denklemi

$$\frac{d^2x}{dt^2} + f(x)\frac{dx}{dt} + g(x) = 0 \quad (1)$$

olarak verilir [8]. Van der Pol denklemi Liénard denklemi'nin özel bir hâlidir ve

$$\frac{d^2V}{dt^2} - \frac{a}{c}(1 - V^2)\frac{dV}{dt} + \frac{1}{LC}V = 0 \quad (2)$$

olarak verilir ve bir VDPO'yu tanımlar. Burada $V(t)$ Şekil 2'de görülen VDPO'daki devre elemanlarının gerilimini tanımlar. Şekil 6'da görülen devre elemanları paralel bağlı olduğundan, kondansatörün, endüktörün, ters-paralel Schottky diyot dizisinin ve negatif direnç dönüştürücü devresinin gerilimleri birbirine eşittir:

$$V = V_c = V_L = V_N = V_{Dizi} \quad (3)$$

Burada endüktörün gerilimi V_L , kondansatörün gerilimi V_c , negatif direnç dönüştürücünün gerilimi V_N , ters-paralel Schottky diyot dizisinin gerilimi V_{Dizi} 'dir.

Bir Schottky diyotun genel akım denklemi, Shockley diyot denklemi ile verilir [22]:

$$i_D = i_s \left(e^{\frac{V_D}{nV_T}} - 1 \right) \quad (4)$$

Burada V_D Schottky diyot gerilimi, i_D Schottky diyot akımı, i_s Schottky diyotun tıkama akımı, n Schottky diyotun ideallik katsayısı ve V_T termal gerilimdir.

Ters-paralel bağlı bir Schottky diyot çiftinin toplam akımı, N tane ters-paralel diyot çifti seri bağlanırsa;

$$i_{Dizi} = i_{D1} - i_{D2} = i_s \left(e^{\frac{V_{Dizi}}{nV_T}} - e^{-\frac{V_{Dizi}}{nV_T}} \right) \quad (5)$$

$$i_{Dizi} = i_{D1} - i_{D2} = 2i_s \sinh \left(\frac{V_{Dizi}}{nV_T} \right) \quad (6)$$

olarak yazılabilir.

Denklem (6)'daki sinh terim Maclaurin serisine açılır ve sadece ilk 2 terim alınırsa:

$$\sinh \left(\frac{V_{Dizi}}{nV_T} \right) \approx \frac{V_{Dizi}}{nV_T} + \frac{\left(\frac{V_{Dizi}}{nV_T} \right)^3}{3!} \quad (7)$$

bulunur. Böylece ters-paralel Schottky diyot dizisinin akımı

$$i_{Dizi} \approx 2i_s \left(\frac{V_{Dizi}}{nV_T} + \frac{\left(\frac{V_{Dizi}}{nV_T} \right)^3}{3!} \right) \quad (8)$$

olarak elde edilir.

Negatif direnç dönüştürücü devresinin giriş akımı

$$i_{neg} = i_N = g_N V_N = -V_N \frac{R_2}{R_1 * R_3} \quad (9)$$

olarak verilir.

Ters-paralel bağlı Schottky diyot dizisinden ve negatif direnç dönüştürücü devresinden oluşan nonlineer negatif direncin akım denklemi:

$$i_{Nr} = i_{Dizi} + i_N \quad (10)$$

olarak verilir. Lineer zamanla değişmeyen endüktörün akım denklemi:

$$i_L = \frac{1}{L} \int_0^t V_L dt + i_L(0) \quad (11)$$

olarak verilir. Kondansatörün uç denkleminin

$$i_c = C \frac{dV_c}{dt} \quad (12)$$

olduğu hatırlanır ve Kirchoff'un Akımlar Kanunu kullanılırsa:

$$i_c + i_{Nr} + i_L = 0 \quad (13)$$

Denklemi elde edilir. Denklem (13)'te devre elemanlarının uç denklemleri yerine yazılır ve yeniden düzenlenirse;

$$C \frac{dV}{dt} + \left(2i_s \left(\frac{V}{nV_T} + \frac{\left(\frac{V}{nV_T} \right)^3}{3!} \right) - \frac{R_2}{R_1 * R_3} V \right) + \frac{1}{L} \int_0^t V dt + i_L(0) = 0 \quad (14)$$

$$\frac{dV}{dt} + \frac{1}{C} \left(2i_s \left(\frac{V}{nV_T} + \frac{\left(\frac{V}{nV_T} \right)^3}{3!} \right) - \frac{R_2}{R_1 * R_3} V \right) + \frac{1}{LC} \int_0^t V dt + \frac{1}{C} i_L(0) = 0 \quad (15)$$

Denklem (15)'in türevi alınır ve yeniden düzenlenirse

$$\frac{d^2V}{dt^2} + \frac{1}{C} \left(2i_s \left(\frac{1}{nV_T} \left(1 + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{nV_T} \right)^2 V^2 \right) - \frac{R_2}{R_1 * R_3} \right) \right) \frac{dV}{dt} + \frac{1}{LC} V = 0 \quad (16)$$

$$\frac{d^2V}{dt^2} = -\frac{1}{C} \left(2i_s \left(\frac{1}{nV_T} \left(1 + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{nV_T} \right)^2 V^2 \right) - \frac{R_2}{R_1 * R_3} \right) \right) \frac{dV}{dt} - \frac{1}{LC} V \quad (17)$$

$$\frac{d^2V}{dt^2} = -\frac{1}{C} \left(\left(\frac{2i_s}{nV_T} - \frac{R_2}{R_1 * R_3} \right) + i_s \left(\frac{1}{nV_T} \right)^3 V^2 \right) \frac{dV}{dt} - \frac{1}{LC} V \quad (18)$$

eşitliği elde edilir. Sadeleştirme için takip eden parametreler tanımlanacaktır:

$$c = \frac{2i_s}{nV_T} \quad (19)$$

$$a = -\left(c - \frac{R_2}{R_1 * R_3} \right) \quad (20)$$

$$b = i_s \left(\frac{1}{nV_T} \right)^3 \quad (21)$$

Bu parametreleri kullanarak Denklem (18) yeniden yazılırsa:

$$\frac{d^2V}{dt^2} = -\left(-\frac{a}{C} + \frac{bV^2}{C} \right) \frac{dV}{dt} - \frac{1}{LC} V \quad (22)$$

elde edilir.

İlaveten şu takip eden parametreler tanımlanacaktır:

$$\beta = \frac{b}{a} = 1 \quad (23)$$

$$\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (24)$$

$$\tau = \omega_1 t \quad (25)$$

$$\omega_1^2 = \frac{1}{LC} \quad (26)$$

μ , doğrusal olmayan sönümlenmenin, gücünü gösteren skaler parametredir [18] ve

$$\mu = \frac{a}{\omega_1 C} = \frac{a}{\frac{1}{\sqrt{LC}} C} = \frac{a}{\frac{C}{\sqrt{L}}} = a \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (27)$$

olarak verilir. Denklem (22) yeni tanımlanan parametrelerle yeniden düzenlenirse;

$$\frac{d^2 V}{d\tau^2} - \frac{a}{\omega_1 C} (1 - \beta V^2) \frac{dV}{d\tau} + V = 0 \quad (28)$$

$$\frac{d^2 V}{d\tau^2} = \mu (1 - V^2) \frac{dV}{d\tau} - V \quad (29)$$

$$\frac{d^2 V}{d\tau^2} - \mu (1 - V^2) \frac{dV}{d\tau} + V = 0 \quad (30)$$

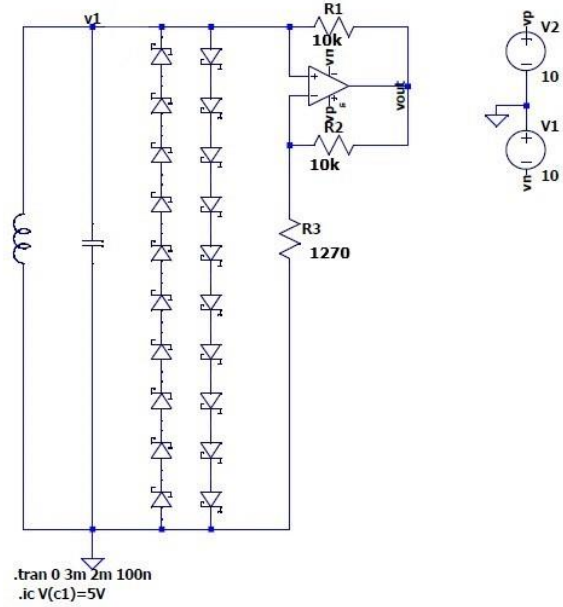
elde edilir. Denklem (30) bu çalışmada incelenen VDPO sisteminin ölçeklenmiş zaman yani τ cinsinden 2. dereceden bir denklem olarak ifadesidir. Van der Pol'ün tanımladığı denklemlerle uygun devreler Van der Pol Osilatörü olarak adlandırıldığından, bu çalışmada incelenen devrenin bir VDPO'yu tanımladığı gösterilmiştir.

4. VDPO Devresinin Benzetimi

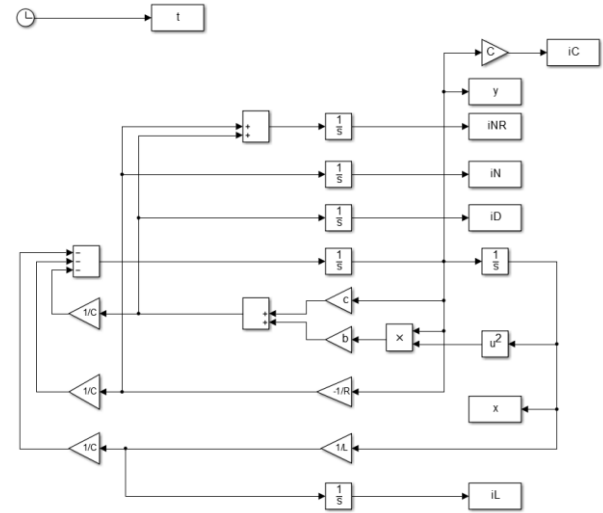
Bu bölümde LTspice kullanarak Şekil 7'de görülen VDPO devresinin ve Simulink kullanarak Şekil 8'de görülen blok diyagramı ile üçüncü bölümde türetilen VDPO denkleminin benzetimi yapılmıştır. LTspice kütüphanesinde mevcut olan 1N5817 Schottky diyotu benzetimlerde kullanılmıştır. Tablo 1'de VDPO'nun LTspice ile benzetiminde kullanılan parametreler verilmiştir. Tabloda verilen parametreler kullanılarak $\mu = 4,92$ olarak hesaplanmıştır. Ters-paralel bağlı aktif diyot çifti sayısı, $N = 10$ seçildiğinden, toplamda 20 adet Schottky diyot kullanılmıştır. Denklem (22)'de a ve b değerlerinin birbirine eşit ($a = b$) olması için R_1, R_2 ve R_3 uygun şekilde seçilmiştir.

Tablo 1. Van der Pol Osilatörü Devresinin Parametreleri

Devre Parametresi	Değeri
i_s	31,7 μA (25 °C'ta)
R_s	0,051 Ohm
C_{jo}	190 pF
N	10
n	1,373
V_T	26 mV (25 °C'ta)
C	2 nF
L	100 mH
R_1	10 kOhm
R_2	10 kOhm
R_3	1,27 kOhm



Şekil 7: Paralel Van der Pol Osilatörü'nün LTspice ile Modellenmesi

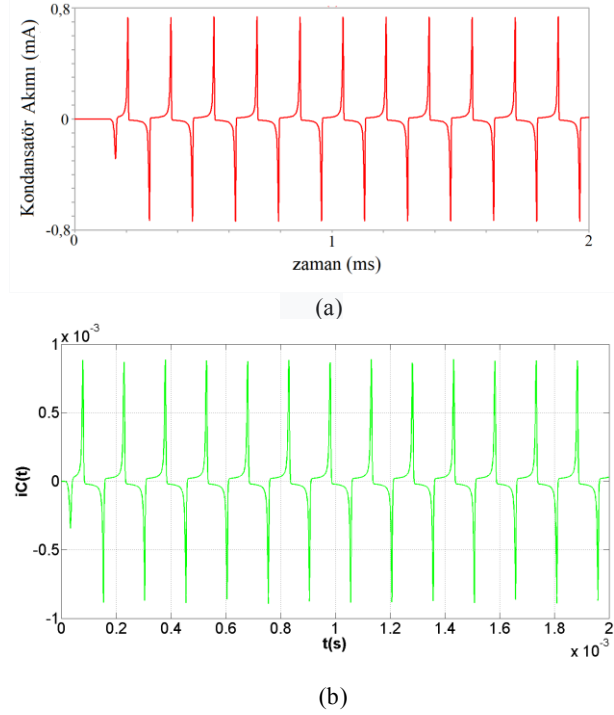


Şekil 8: Paralel Van der Pol Osilatörü'nün Simulink ile Modellenmesi

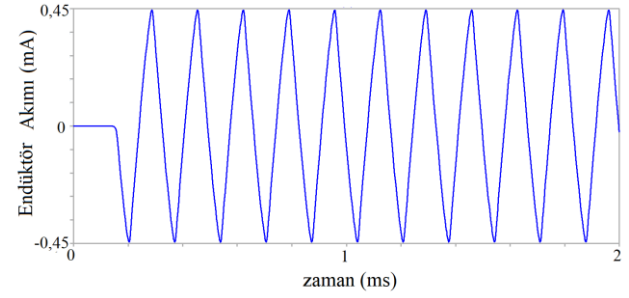
Devrenin benzetimi her iki programda da 2ms için yapılmıştır. Her iki programda yapılan benzetimler sonucunda elde edilen devre elemanlarının akımlarının ve gerilimlerinin zamana göre değişimleri, devredeki değişkenlerin sınır döngüleri, bazı devre elemanlarının $v-i$ karakteristikleri takip eden şekillerde verilmiştir. Şekil 9-12'deki grafiklerde VDPO'nun geçici durumdan çıkarak kalıcı duruma geçtiği görülmektedir. Periyodik kararlı hâlde akımların ve gerilimin içinde harmonikler olduğu görülmektedir.

Tablo 1’de 1N5817 Schottky diyotun kontak direnci R_s ve eklem kapasitansı C_{jo} da verilmiştir. Bu parametreler üçüncü bölümde VDPO’nun analizinde kullanılmamıştır. Bu değerlerden dolayı Simulink’te ve LTspice’ta yapılan benzetim sonuçları arasında farklar bulunmaktadır.

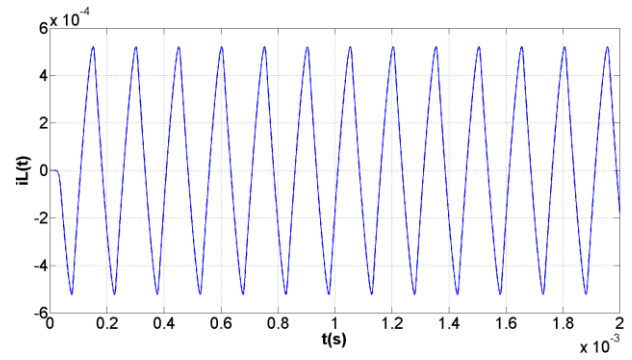
VDPO’nun kondansatör akımının zaman göre değişimi Şekil 9’da verilmiştir. Simulink’te bulunan kondansatör akımı LTspice’ta bulunandan neredeyse % 25 daha yüksektir ama Şekil 10’da verilen VDPO’nun endüktör akımı her iki program için de hemen hemen aynı değere sahiptir. Şekil 11’de görülen VDPO gerilimi Simulink’te neredeyse % 30 daha yüksek bulunmuştur. Şekil 12’de Schottky diyot dizilerinin akımları verilmiştir. Simulink’te elde edilen Schottky diyot dizi akımı hemen hemen % 35 daha yüksektir. Şekil 12.a’da LTspice’tan elde edilen benzetim sonucunda Schottky diyot dizilerinde her bir kolun sadece bir yöne akım geçirmekte olduğu görülebilir. Her iki programda elde edilen tüm dalga şekilleri birbirine benzerdir ancak genlikleri farklıdır.



Şekil 9: VDPO Kondansatörünün a) LTspice Programında ve b) Simulink’te Elde Edilen Akımı

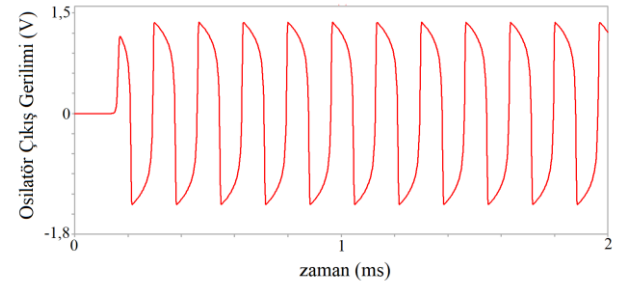


(a)

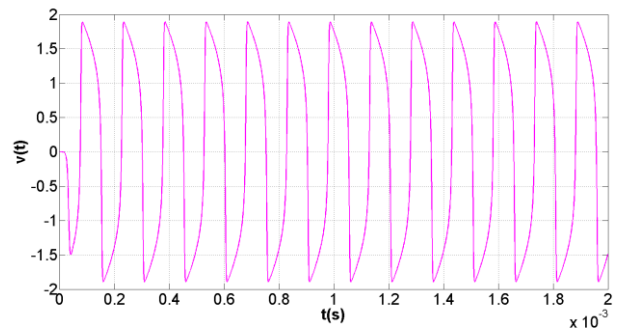


(b)

Şekil 10: VDPO Endüktörünün a) LTspice Programında ve b) Simulink’te Elde Edilen Akımı

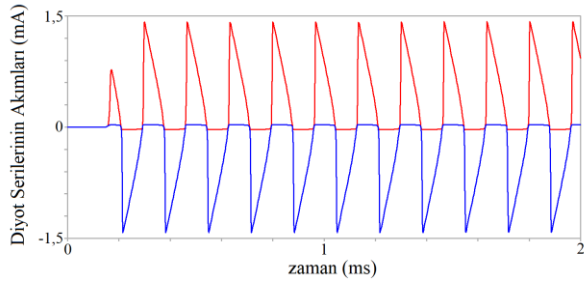


(a)

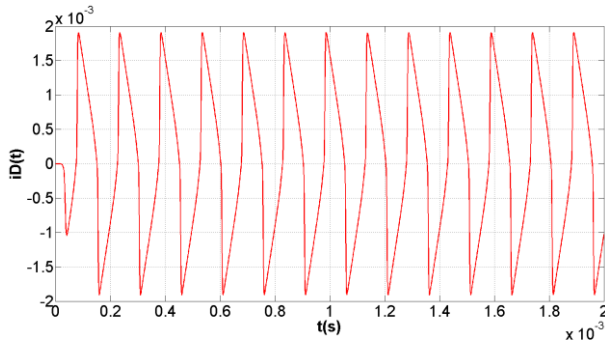


(b)

Şekil 11: Devre Geriliminin a) LTspice Programında ve b) Simulink’te Elde Edilen Zamana Göre Değişimi

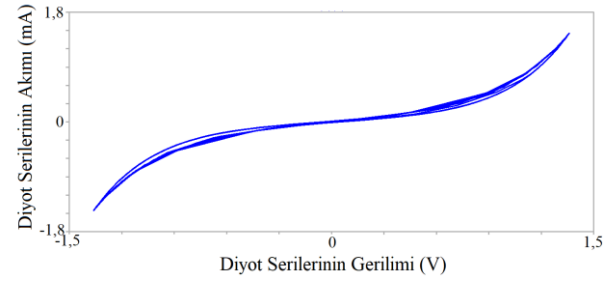


(a)

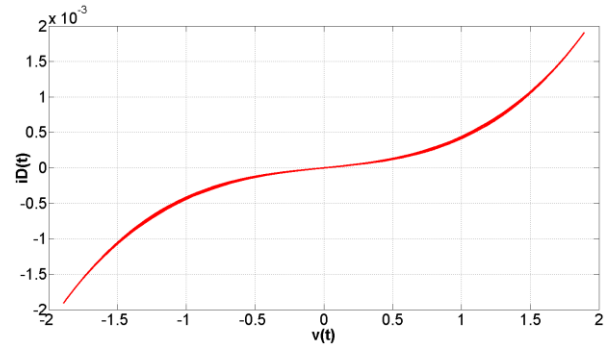


(b)

Şekil 12: VDPO Schottky Diyot Dizisinin a) LTspice Programında ve b) Simulink'te Elde Edilen Akımı



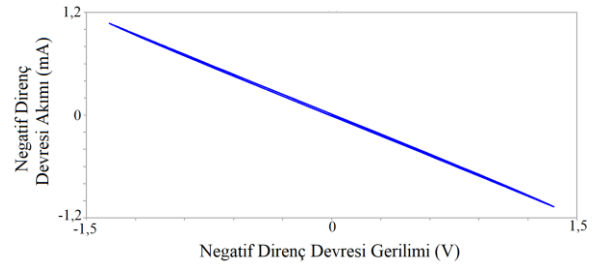
(a)



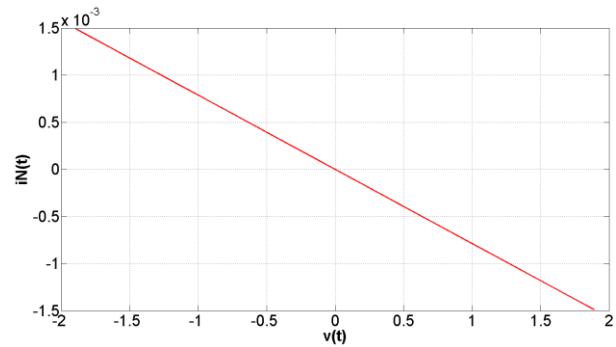
(b)

Şekil 13: Ters-paralel Schottky Diyot Dizisinin a) LTspice Programında ve b) Simulink'te Elde Edilen $V-I$ Karakteristiği

Şekilde 13'te görüldüğü üzere LTspice'teki diyot karakteristiği ile ideal diyot denkleminin verdiği diyot karakteristiği aynı değildir. Bu LTspice'ta 1N5817 Schottky diyotunun üçüncü bölümde kullanılan daha gelişmiş bir modeli olmasından kaynaklanmaktadır. Buna rağmen Şekil 13'te görüldüğü gibi ters-paralel Schottky diyot dizisinin geriliminin akımına göre değişimi grafiği sinüs hiperbolik fonksiyonu andırmaktadır. Şekil 14'te görüldüğü üzere negatif direnç dönüştürücü karakteristiği her iki program için de aynıdır. Şekil 15'te görüldüğü üzere diyot modelinden kaynaklı olarak eşdeğer negatif direnç karakteristikleri birbirinden farklıdır. Buna rağmen Şekil 15.a'da LTspice kullanılarak elde edilen nonlinear negatif direncin $v-i$ karakteristiği kübik bir fonksiyona benzemektedir. Üçüncü bölümde sinh fonksiyonunun Maclaurin serisinden alınan ilk iki terim ile modellenen nonlinear negatif direncin $v-i$ karakteristiği ise bir kübik fonksiyondur. Şekil 15.b'de Simulink'te elde edilen $v-i$ karakteristiği geçici hâl analizinden ve programdaki sayısal analiz hatalarından dolayı kübik fonksiyonun eğrisi civarında kalmaktadır.

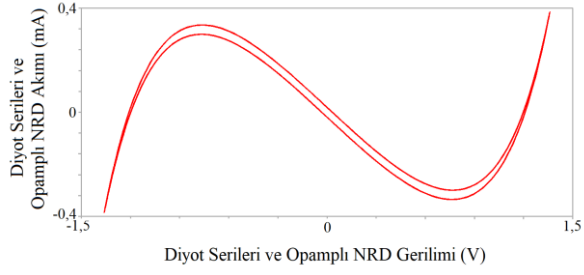


(a)

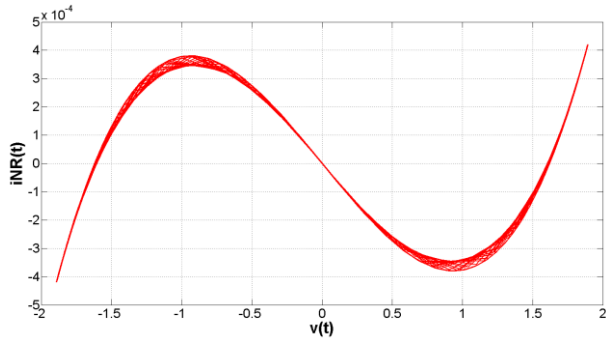


(b)

Şekil 14: Negatif Direnç Dönüştürücünün a) LTspice Programında ve b) Simulink'te Elde Edilen $V-I$ Karakteristiği



(a)

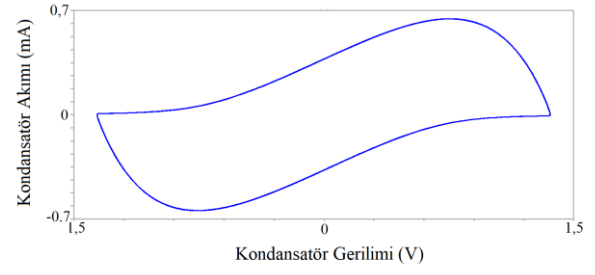


(b)

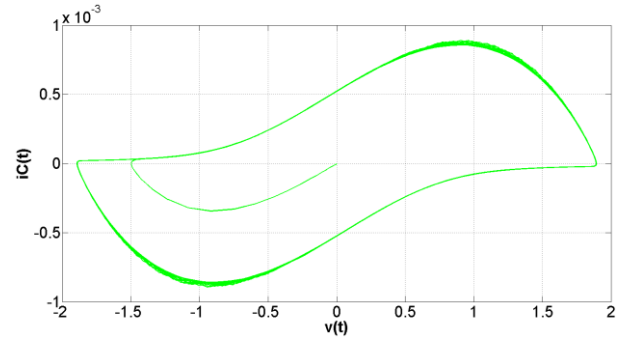
Şekil 15: Nonlineer Negatif Direncin a) LTspice Programında ve b) Simulink'te Elde Edilen $V-I$ Karakteristiği

Kalıcı hâlde sınır döngüsüne erişildiği Şekil 16 ve 17'de görülebilir. Şekil 16'da verilen her iki programda elde edilen VDPO gerilimi ve kondansatör akımı sınır döngüleri benzer şekillere sahiptir ama bu değişkenlerin genlikleri farklıdır. Şekil 17'de verilen her iki programda elde edilen VDPO gerilimi ve endüktör akımı sınır döngüleri de benzer şekillere sahiptir ama farklı genliklere sahiptir.

Daha önce belirtildiği üzere her iki programda elde edilen tüm dalga şekilleri birbirine benzemesine rağmen genlikleri farklıdır. Bu farklılıkların temelde nedeninin kullanılan diyotun modellenmesinde Shockley diyot denkleminin yetersiz kalmasından kaynaklandığı söylenilebilir. Hatanın bir diğer nedeni ise üçüncü bölümde yapılan analizde hesaba katılmayan ama 1N5817 Schottky diyotlarının sahip olduğu eklem kapasitansı ve kontak dirençleridir. LTspice'ta hesaba katılan bu parametrelerden dolayı LTspice'ta bulunan diyot dizisinin gerilimi ve akımı daha düşüktür. Farklılıkların diğer bir nedeni ise üçüncü bölümde diyotun akımı Maclaurin serisine açılıp sadece ilk iki terim alınmış olmasıdır. Gerçekte ters-paralel bağlı diyot dizisinin akımı hemen hemen sinh fonksiyonudur. Diyot dizisinin gerilimi arttığında Maclaurin serisinin alınmayan terimleri benzetim sonuçları arasında farklılık olmasına neden olmaktadır.

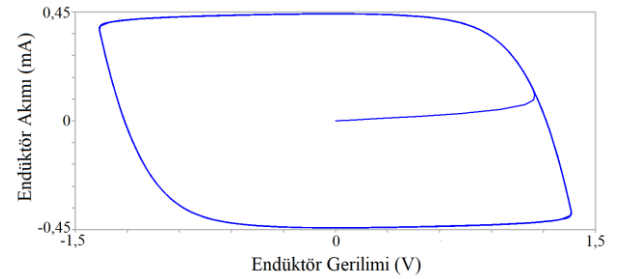


(a)

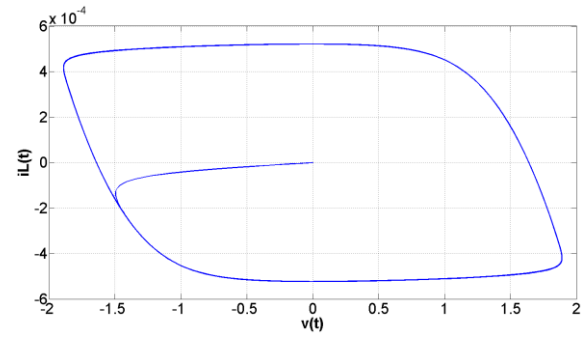


(b)

Şekil 16: a) LTspice programında ve b) Simulink'te Elde Edilen VDPO Gerilimi ve Kondansatör Akımı Sınır Döngüsü



(a)



(b)

Şekil 17: a) LTspice programında ve b) Simulink'te Elde Edilen VDPO Gerilimi ve Endüktör Akımı Sınır Döngüsü

5. Sonuç

Van der Pol Osilatörü, transistör, op-amp, tünel diyot, Schottky diyot, köprü diyot devre elemanları ile gerçekleştirilebilmektedir. Bu çalışmada Van der Pol Osilatörü'nün nonlineer direncini elde etmek için ters-paralel Schottky diyot dizisi ve negatif direnç dönüştürücüsüne sahip bir topoloji kullanılmıştır. Van der Pol Osilatörü bu nonlineer direnci, endüktörü ve kondansatörü paralel bağlayarak oluşturulmuştur. Devrenin diferansiyel denklemleri türetilmiş ve VDPO olarak çalıştığı gösterilmiştir. VDPO'nun benzetimi LTspice ve Simulink programlarında yapılmıştır. Benzetim sonucunda, VDPO devre elemanlarının akımlarının ve geriliminin zamana göre değişimleri, devre elemanlarının $v-i$ grafikleri ve sınır döngüsü verilmiş, Schottky diyotlar kullanılarak da VDPO yapılabileceği gösterilmiştir. Schottky diyotların modelinin üçüncü bölümde kullanılan modelden daha karmaşık olmasından dolayı LTspice ve Simulink benzetimlerinden elde edilen akım ve gerilimlerin genlikleri arasında % 30 civarı bir fark bulunmaktadır. Bu fark daha gerçekçi bir diyot modeli kullanılarak azaltılabilir.

Kaynaklar

- [1] B. van der Pol, "A theory of the amplitude of free and forced triode vibrations", *Radio Review*, 1, pp. 701–710, 754–762, 1920.
- [2] B. Van der Pol, LXXXVIII. On "relaxation-oscillations", *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 2(11), 978-992, 1926.
- [3] B. Van der Pol, J. Van Der Mark, "Frequency demultiplication", *Nature*, 120(3019), 363-364, 1927.
- [4] B. van der Pol, "The nonlinear theory of electric oscillations", *Proc. IRE*, 22, pp. 1051–1086, 1934.
- [5] M. L. Cartwright, "Balthazar van der Pol", *J. London Math. Soc.*, 35, pp. 367–376, 1960.
- [6] M. L. Cartwright, "I. Van der Pol's Equation for Relaxation Oscillations", In *Contributions to the Theory of Nonlinear Oscillations (AM-29), Volume II*, Princeton University Press., (pp. 1-18), 2016.
- [7] A. Liénard, "Etude des oscillations entretenues," *Revue générale de l'électricité*, 23, pp. 901–912 and 946–954, 1928.
- [8] T. Marios, "Theoretical and Numerical Study of the Van der Pol equation", *Dissertation*, 2006.
- [9] J. M. Ginoux, C. Letellier, "Van der Pol and the history of relaxation oscillations: Toward the emergence of a concept", *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, 22(2), 023120, 2012.
- [10] J. Gleick, M. Berry, "Chaos-making a new science", *Nature*, 330, 293, 1987.
- [11] S. Ahmad, "Study of Non-linear Oscillations Using Tunnel Diode", *Doctoral dissertation*, 1962.
- [12] T. J. Slight, B. Romeira, L. Wang, J. M. Figueiredo, E. Wasige, C. N. Ironside, "A Liénard oscillator resonant tunnelling diode-laser diode hybrid integrated circuit: model and experiment", *IEEE journal of quantum electronics*, 44(12), 1158-1163, 2008.
- [13] L. Wang, "Reliable design of tunnel diode and resonant tunnelling diode based microwave sources", *Doctoral dissertation*, University of Glasgow, 2012.
- [14] J. Casaleiro, L. B. Oliveira, A. C. Pinto, "Van der Pol Approximation Applied to Wien Oscillators", *Procedia Technology*, 17, 335-342, 2014.
- [15] J. Brechtel, X. Xie, P. K. Liaw, "Investigation of chaos and memory effects in the Bonhoeffer-van der Pol oscillator with a non-ideal capacitor", *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 73, 195-216, 2019.
- [16] M. Dursun, E. Kaşifoğlu, "Design and implementation of the FPGA-based chaotic van der pol oscillator", *International Advanced Researches and Engineering Journal*, 2(3), 309-314, 2018.
- [17] Makoto Itoh, Leon O. Chua, "Dynamics of memristor circuits", *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 24(05), 1430015, 2014.
- [18] J. R. M. Pone, S. Çiçek, S. T. Kingni, A. Tiedeu, M. Kom, "Passive-active integrators chaotic oscillator with anti-parallel diodes: analysis and its chaos-based encryption application to protect electrocardiogram signals", *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, 1-15, 2019.
- [19] K. Srinivasan, V. K. Chandrasekar, A. Venkatesan, I. R. Mohamed, "Duffing-van der Pol oscillator type dynamics in Murali-Lakshmanan-Chua (MLC) circuit", *Chaos, Solitons & Fractals*, 82, 60-71, 2016.
- [20] B. Bao, H. Wu, L. Xu, M. Chen, W. Hu, "Coexistence of multiple attractors in an active diode pair based Chua's circuit", *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 28(02), 1850019, 2018.
- [21] T. Kanamaru, "Van der Pol oscillator", *Scholarpedia*, 2(1), 2202, 2007.
- [22] R. L. Boylestad, L. Nashelsky, "Electronic devices and circuit theory", *Pearson Education India*, 2009.
- [23] Electronics Tutorials, URL: https://www.electronicstutorials.ws/diode/diode_4.html (Erişim Zamanı; Mart 9, 2021)
- [24] Wilderness Labs, Electronics, General Diodes, URL: http://developer.wildernesslabs.co/Hardware/Tutorials/Electronics/Part6/General_Diodes/ (Erişim Zamanı; Mart 10, 2021)
- [25] G. Mykolaitis, A. Tamaševičius, S. Bumelienė, A. Namajūnas, K. Pyragas, V. & Pyragas, "Application of ultrafast Schottky diodes to high megahertz chaotic oscillators", *Acta Physica Polonica A*, vol. 107, no. 2, p. 365, 2005.

[26] Alldatasheet,

URL: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/479637/LUGUANG/1N5819.html>

(Erişim Zamanı; Mayıs 13,2021)

Kübra ÇAKIR



Kübra ÇAKIR, 1999 yılında Çanakkale’de doğdu. 2019 yılında İstanbul Üniversitesi Yönetim Bilişim Sistemleri bölümünü okumaya başlamıştır. 2020 yılında Anadolu Üniversitesi Adalet bölümünü tamamladı. 2017 yılında okumaya başladığı Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği bölümünün stajlarını TEİAŞ Çanakkale İşletme ve Bakım Müdürlüğü’nde ve Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi’nde yapmıştır. Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği bölümünden 2021 yılında mezun olmuştur. 2021 yılında başladığı Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği bölümü yüksek lisans programında okumaktadır. Osilatör devreleri üzerine kendisini geliştirmeye devam etmektedir.

Doç. Dr. Reşat MUTLU



Doç. Dr. Reşat MUTLU, 1973 yılında Tekirdağ’da doğdu. Lisans eğitimini Yıldız Teknik Üniversitesi Elektrik Mühendisliği bölümünde, Yüksek lisans ve doktorasını ise Rensselaer Polytechnic Enstitü’de sırasıyla 1998 ve 2004 yıllarında tamamladı. An itibarıyla Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Çorlu Mühendislik Fakültesi’nde doçent olarak görev yapmaktadır. Çalışma alanları Elektronik sistemlerin modellenmesi, Memristör, Memristif sistemler, Rezistif RAM bellekler, Güç hattı haberleşme sistemleri ve Rezistif sinterleme sistemleridir.

Dr. Öğr. Üyesi Ertuğrul KARAKULAK



Dr. Öğr. Üyesi Ertuğrul KARAKULAK, 1979 yılında Tekirdağ’da doğdu. Lisans eğitimini Sakarya Üniversitesi Elektronik Öğretmenliği, yüksek lisansını Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde, doktora eğitimini ise Trakya Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümünden tamamladı. Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulunda Doktor Öğretim Üyesi olarak görev yapmaktadır. Çalışma alanları Memristör ve Rezistif RAM belleklerdir.

Simulink Üzerinden Medikal Yardımcı Açık Kaynak Robot Kolun İleri ve Ters Kinematik Analizinin Simülasyonu

Simulation of the Forward and Inverse Kinematic Analysis of Medical Assistant Open-Source Robot Arm via Simulink

Mehmet Gül



Bilgisayar Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Şırnak Üniversitesi, Şırnak, Türkiye

mgul@sirnak.edu.tr; mehmetgul@ymail.com

Özet

Teknolojinin her geçen gün baş döndüren bir hızla insan hayatına etki etmesi, özellikle teknoloji çıktılarının günlük hayatta kullanımlarının artması kaçınılmaz bir gelişmedir. Robotik sistemlerin yaygınlaşması buna örnek olarak gösterilebilir. Gelişen teknoloji ürünlerinden 3D yazıcılar ile basılan model çalışmalar ve dahi basılabilir robotik sistemler önemli derecede bütçe tasarrufu sağlamaktadır. Bu kapsamda çalışmada 3D yazıcılar ile basılan açık kaynak robot kol ile telif hakkı sorununun üstesinden gelinmesi amaçlandı. Bu sayede telif hakkından kaynaklı yaptırımlardan da kaçınılmaktadır. Çalışma kapsamında geliştirilen 5 serbestlik derecesine (DoF) sahip olan robot kol özellikle COVID-19 gibi pandemi hastalıklarında hastane çalışanlarının kullanımı için önerilmektedir. Kullanıcı arayüzü ile simülasyon üzerinden robot kolun ileri ve ters kinematik analizleri incelendi. Kinematik analizi kullanılan robotun çalışma uzayının belirlenmesi açısından önemlidir. Çalışma uzayı belirlenen robot kolun kontrolü de bir o ölçüde çalışma uzayına bağlıdır. Çalışmada kinematik analiz yazılımı da açık kaynak olarak paylaşmakta ve bu durumun açık kaynak geliştirilebilir robotik sistemlerin yaygınlaştırılmasına ön ayak olması umut edilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Simulink, MATLAB, Açık Kaynak Robot Kol, İleri Kinematik Analizi, Ters Kinematik Analizi

Abstract

Technology impacts human life at a dizzying speed, especially, the increase of the use of technological outputs in daily life is an inevitable development. The widespread use of robotic systems can be shown as an

example. The model works printed with 3D printers, among the developing technology products, and even printable robotic systems provide significant budget savings. In this study, it was aimed to overcome the copyright problem with an open-source robot arm printed with 3D printers in this scope. In this way, sanctions arising from copyright are avoided. The robot arm with 5 degrees of freedom (DoF) developed within the scope of the study is especially recommended for the use of hospital staff in pandemic diseases such as COVID-19. The forward and inverse kinematic analyzes of the robot arm were examined through the simulation with the user interface. Kinematic analysis is important in determining the working space of the robot used. The control of the robot arm whose working space is determined is also shared as open-source, and it is hoped that this situation will lead to the spread of open-source developable robotic systems.

Keywords: Simulink, MATLAB, Open-Source Robot Arm, Forward Kinematic Analysis, Inverse Kinematic Analysis

I. Giriş

Gelişen teknoloji çıktılarının günlük hayatta artan kullanımlarına her geçen daha fazla rastlamak mümkündür. Bu çıktılar arasında robotik sistemlerin artan etkisini görmekteyiz. Uluslararası robot federasyonu (IFR) verilerine göre, bu kullanım 2018 ile 2021 yılları arasında dünya genelinde 2 milyon adedi aşacağı öngörülmektedir [1]. Yapılan çalışmada açık kaynak profesyonel ölçülerde ve endüstriyel kullanıma uygun bir robotik sistem geliştirilip, robotun kinematik analizi çalışmada incelendi. Çalışmada geliştirilen robotik kolun eklemeleri, Thingiverse web sayfasında

paylaşılan açık kaynak bir robot kolun referans ölçüleri dikkate alınarak tekrar tasarlandı ve 3D yazıcı üzerinden basıldı. Çalışmanın icra edilmesinin bir önemi, günümüzde özellikle insan sağlığını tehdit eden bulaşıcı hastalıklarda önemli görev alan sağlık personelleri için çalışma ortamında yardımcı bir ekipman olacak robotik sistemler tasarlamaktır.

Çalışmada referans alınan açık kaynaklı robot kolun eklemleri referans alınarak tekrar tasarlandı ve robot kolun çalışma uzayı istenildiği ölçülerde genişletilebilir duruma getirildi. Çalışma alanı, erişilebilir 3B uzay ortamında bulunan uç efektörün erişim alanını ifade eder. Tasarım aslına uygun şekilde açık kaynak olarak paylaşmakta ve ayrıca açık kaynaklı robot kolun kullanımından kaynaklı bazı avantajları bulunmaktadır. Açık kaynaklı robot kolun en büyük avantajı, telif hakkının olmaması ve hatta düşük maliyetidir. Endüstriyel ölçekteki robot kolların telif hakkı olması ve bakım sorunları robotik sistemler için ciddi sorunlara neden olabilir. Üstelik 3D yazıcılardan istenilen filament türü ile, karbon fiber gibi, baskı yapılabilmesi masrafları tamamen düşürmekte ve dayanıklılığını da artırmaktadır.

Çalışmada kullanılan robot kolun çalışma alanını belirlemek için ileri ve ters kinematik analiz incelemeleri yapıldı. Robotik sistemlerin çalışma alanını ortaya çıkarmak için kinematik modeller oluşturulmalıdır. Kartezyen uzay ve quaternion uzayı, kinematik analiz çalışmalarında kullanılan iki farklı uzay modelidir. Kartezyen uzayda koordinat sistemindeki iki koordinatın dönüşümü tek bir dönüşüme ve bir çeviriye indirgenebilir. Rotasyonu temsil etmek için kullanılan yaklaşımlar arasında Gibbs vektörü, Euler açıları, Cayley-Klein parametreleri ve ortonormal matrisler kullanılır. Robot sistemlerinde ağırlıklı olarak 4x4 gerçek matrislere dayanan homojen dönüşümler baskın olarak kullanılır [2].

Özellikle hastane koşullarının iyileştirilmesi amaçlı 3D yazıcıdan basılan mafsallı robot kol 5 serbestlik derecesine (DoF) sahiptir. Robotik kolun ileri ve ters kinematik analizi, robotik kolu kontrol etmek için çalışma kapsamında incelenmiştir ve çalışma alanının belirlenmesi açısından önemlidir. İleri kinematik, robotik kollarla verilen görevleri yerine getirirken yapmış olduğu ileri yönlü hareket olarak bilinir ve bu hareketin incelenmesine ileri kinematik analiz denir. Ters kinematik analiz ise ileri yönlü yapılan hareketin ilk başlangıç konumuna geri döndürülmesi için yapılan analize denir. Özellikle ters kinematik modelleme, günümüzde halen robot araştırmalarında ciddi sorunlardan birini oluşturmaya devam etmektedir. Öte

yandan, robotik kollarla kontrolün sağlanması açısından kullanılan en popüler yöntem hala manuel olarak tasarlanan tarama tablolarına dayanmaktadır [3 – 6]. Çalışmada ileri kinematik analizde Denavit-Hartenberg (D-H) yöntemi uygulanmıştır. D-H yönteminin anahtarı, tüm eklemlerinin koordinat sisteminin ilişkisini göstermektir. Yöntem kapsamında, bir dizi D-H parametresi oluşturulmuştur [7]. Çalışma kapsamında ilerleyen bölümlerde, materyal metot bölümünde kinematik analiz çalışması incelenmiş, tartışma ve sonuç bölümünde ise kinematik analizin yapıldığı yazılımın tasarlanması ve uygulama aşamaları ve elde edilen sonuçlar tartışıldı.

II. MATERYAL METOT

Kinematik analiz, koordinat sistemine referansla zaman fonksiyonuna bağlı hareket geometrisinin analizidir. Oluşan belirli bir manipülatörün eklem açıları ve vektörü

$$q(t) = (q_1(t), q_2(t), \dots, q_n(t))^T \quad (1)$$

Diğer bir deyişle, kinematik analiz uç efektörünün 3 boyutlu uzaydaki konumu ve yönünün belirlenmesidir. Tanımlanan parametreler dikkate alındığında robot koldaki tüm manipülatörlerin sabit eksen setleri, uç efektörüne bağlıdır.

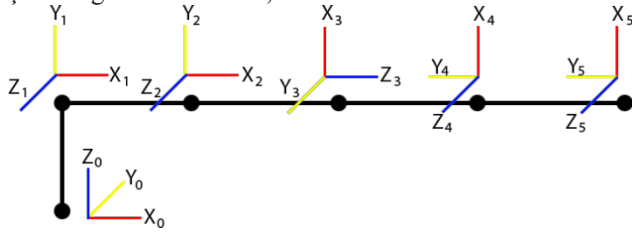


Şekil 1: 5 serbestlik derecesine sahip robotik kol

3D yazıcılar üzerine basılan robotik kol, 5 DoF, mafsallı tip, endüstriyel ölçekli ve profesyonel özelliklere sahiptir. Robot kolu sabit bir temele yerleştirilir (şekil 1) ve robot kolunun kinematik analizi için gerekli koordinat çerçevesi ataması şekil 2'de gösterilmektedir.

2.1. Homojen Dönüşüm Metoduna Bağlı İleri Kinematik Analiz İncelemesi

Uç fektörün konumu, robotik sistemlerdeki serbestlik derecesine bağlıdır. Uç fektörün konumunun belirlenmesi için yapılan ileri kinematik analiz denir. Robotik kol çalışma alanını tespit etmek, koordinasyon eksenleri üzerindeki uç fektörün konumunu belirlemektir. Analitik yöntem veya D-H yöntemi, ileri kinematik analiz için kullanılan en yaygın yöntemlerdir [7]. Robotik kolun her ekseninin 5 DoF olan rotasyonel eklemleri şekil 1'de gösterilmiş ve her eklemin koordinat sistemi üzerindeki bitişik eklemler arasındaki ilişkiyi tanımlayan bir dönüşüm matrisi verilmiştir. Dönüşüm matrisi, birbirine bağlı iki eklemler arasındaki ilişkiyi ve ${}^{i-1}T_i$ olarak gösterilir. "i" eklemler sayısını temsil ederken, birbirine bağlı eklemlerin oluşturduğu homojen matris şu şekilde gösterilmektedir;



Şekil 2: Açık kaynak robotik kolun koordinat sistemindeki eklemler dizilimi

Homojen dönüşüm metodu

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} {}^{i-1}R_i & D \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

tüm matrislerin çarpımı sonucunda elde edilecek sonuç matrisi

$${}^0T_5 = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4 {}^4T_5 {}^5T_e \quad (3)$$

"e" karakteri koordinat eksenindeki uç fektörü temsil eder, ${}^{i-1}T_i$ değeri "i" ve "i-1" arasındaki koordinatlar arasındaki dönüşüm ilişkisini ifade ederken "i" ve "i-1" arasındaki koordinatlar arasındaki hareket ilişkisi ise ${}^{i-1}R_i$ şeklinde ifade edilir. Homojen dönüşüm matrisindeki diğer matrisler hesaplanırken, taban koordinatı uç fektör koordinatından elde edilir. Dönüşüm matrisinin son fektörünün koordinatı, hesaplama sırasında tabanın koordinatından türetilir.

Birbirine bağlı eklemlerin konumu ve sabit bağlantı yönelimleri, eklemlere göre sabitlemiş koordinat

sistemleri ile tanımlanabilir [8]. Sonuç olarak, her aktif eklemler koordinat sistemine belirlenen konumlarda yerleştirilmelidir [7] ve koordinat sistemine yerleştirilen sabit bağlantılar şekil 2'de gösterilmektedir. Şekil 2'de gösterilen robot kol BCN3D Moveo açık kaynak robot koludur ve 3D yazıcıdan basılarak elde edilmiştir [9]. Koordinat sisteminde 0 tabanı simgelemek, 1 ise ilk eklemleri ifade etmektedir. "i" nolu eklemler bir önceki eklemler ile çakışır. Z eksenleri her dönme eksenine paraleldir, ayrıca Z dönme eksenleri geleneksel sağ el kuralı belirlenir. Sistemin son eksenleri sağ el kuralı ile belirlenirken, koordinat sistemindeki ölçü sınırları da belirlenmelidir.

Robotik kolun homojen dönüşüm matrisleri aşağıda gösterilmektedir;

$$T_1^0 = \begin{bmatrix} C_1 & 0 & S_1 & 0 \\ S_1 & 0 & -C_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & a_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (4)$$

$$T_2^1 = \begin{bmatrix} C_2 & -S_2 & 0 & a_2 C_2 \\ S_2 & C_2 & 0 & a_2 S_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (5)$$

$$T_3^2 = \begin{bmatrix} C_3 & 0 & S_3 & 0 \\ S_3 & 0 & -C_3 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (6)$$

$$T_4^3 = \begin{bmatrix} C_4 & 0 & S_4 & 0 \\ S_4 & 0 & -C_4 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & a_3 + a_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (7)$$

$$T_5^4 = \begin{bmatrix} C_5 & -S_5 & 0 & a_5 C_5 \\ S_5 & C_5 & 0 & a_5 S_5 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (8)$$

2.2. Geometrik Yaklaşım Modeline Göre Ters Kinematik Analiz İncelemesi

Robotik sistemlerde en önemli sorun ters kinematik hesaplamaların yapılmasındaki zorluktur, özellikle robotun konumu ve konuma karşılık gelen tüm eklemler açılarının hesaplanması ciddi problemleri ortaya çıkarır [12]. Belirlenen uç noktanın istenilen konuma sabit referans eksen takımı üzerinde kol parametreleri ile ulaşılabilirliği ve dahi ulaşabilir ise kaç farklı konfigürasyon ile ulaşılabilirliğinin analizine ters kinematik analiz denir. Diğer bir deyişle, eğer n, o, a ve p

değişkenleri ve geometrik değişkenler bilinmesi durumunda eklem değişkenleri θ_i ($i = 1, 2, \dots, 6$) kinematik hesaplamalarında bağlı çözülebilir [13]. Ters kinematik denkleminin çözümü için gerekli olan denklem aşağıdaki gibidir. Medikal yardımcı robotik kolun ters kinematik çözümü için geometrik metot kullanılmıştır (şekil 3).

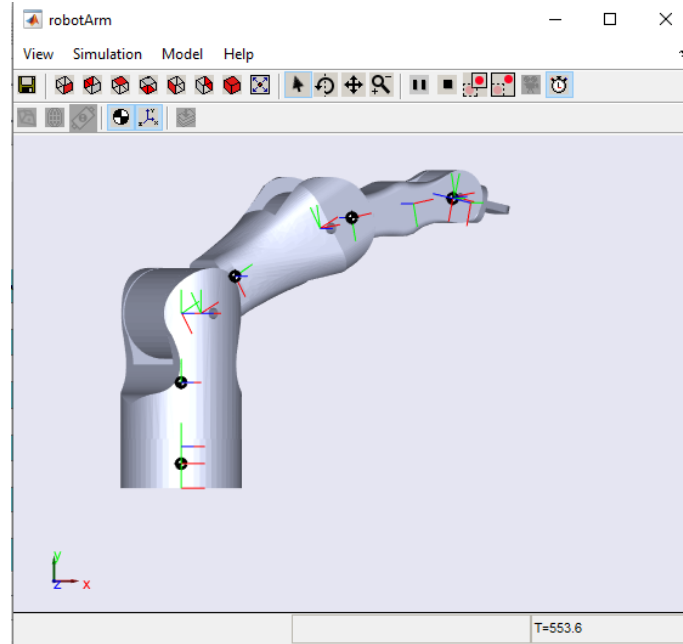
III. TARTIŞMA VE SONUÇ

3.1. İleri ve Ters Kinematik analizi incelemesi

İleri ve ters kinematik analiz MATLAB yazılımı üzerinden incelendi. Ters kinematik analizi işlemi geometrik yaklaşım kullanılmıştır. İleri kinematik analizine kıyasla ters kinematik analizinde birçok zorluk bulunmaktadır. Çalışma kapsamında geometrik metot ile

robot kolun ters kinematik analizi yapılarak çok eksenli mafsallı robot kollar için örnek oluşturacak bir çalışma gerçekleştirilmiştir.

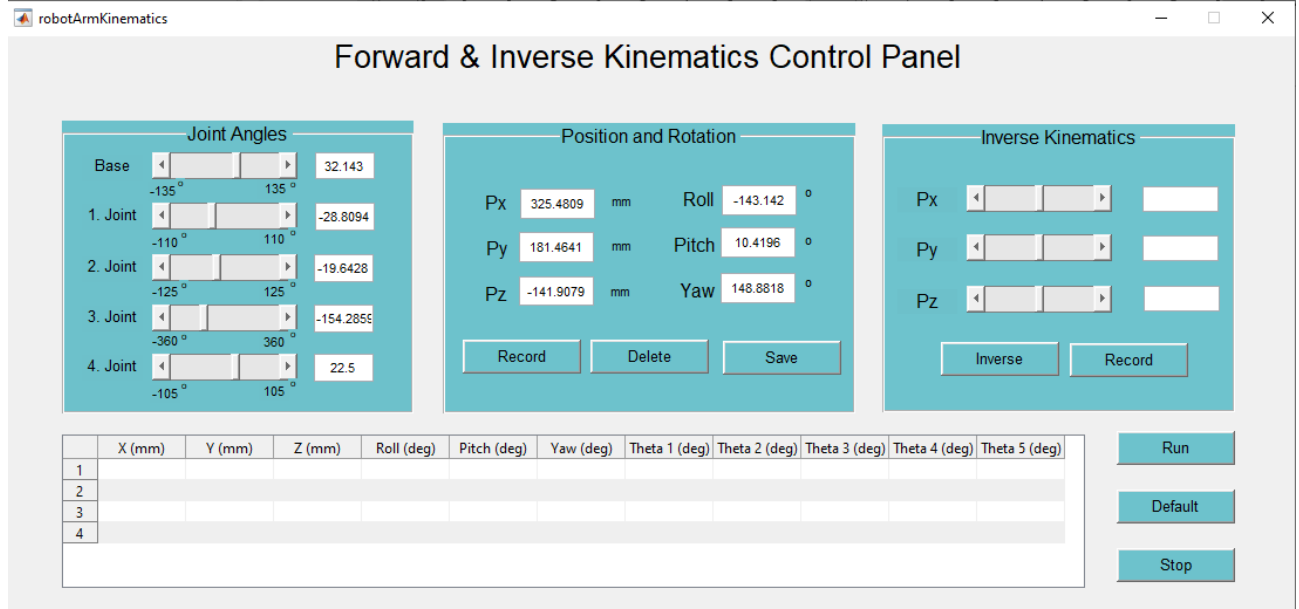
İnceleme MATLAB yazılımı ile beraber çalışan Simulink yazılımı kullanıldı. Simülasyon Simulink yazılımı kullanılarak oluşturuldu. Simülasyonun gerçekleştirilmesi aşamasında robotik kolun eklemleri SolidWorks yazılımı üzerinden, kaynak referanslara bağlı kalarak tekrar tasarlandı. Bu tür bir girişim sonucunda robot kolun çalışma uzayı istenildiği ölçülerde genişletildi. Modellenen eklemler şekil 3'te gösterilmektedir. Simülasyon ayrıca MATLAB yazılımı ile kontrol edildi. Robot kolunun ileri ve ters kinematiklerinin simülasyon kontrol modülü şekil 4'te gösterilmektedir.



Şekil 3: SolidWorks modelleme yazılımı ile modellenen robot kol

Simulink, mekanik yapısal bileşenleri ile zengin veritabanı [10, 11] kontrolü sağlanmasına yardımcı olan son derece kullanışlı bir yazılımdır. Simulink [12, 14] üzerinde çok sayıda sürücü ve sensör çeşidi

bulunmaktadır. Şekil 4'te gösterilen model kullanıcı arayüz sistemi (GUI), Simulink yardımı ile geliştirilmiştir. Robot kolunun 3. ve 4. mafsalları, bükümlü eklem modeli ile ilişkilendirilmiştir.



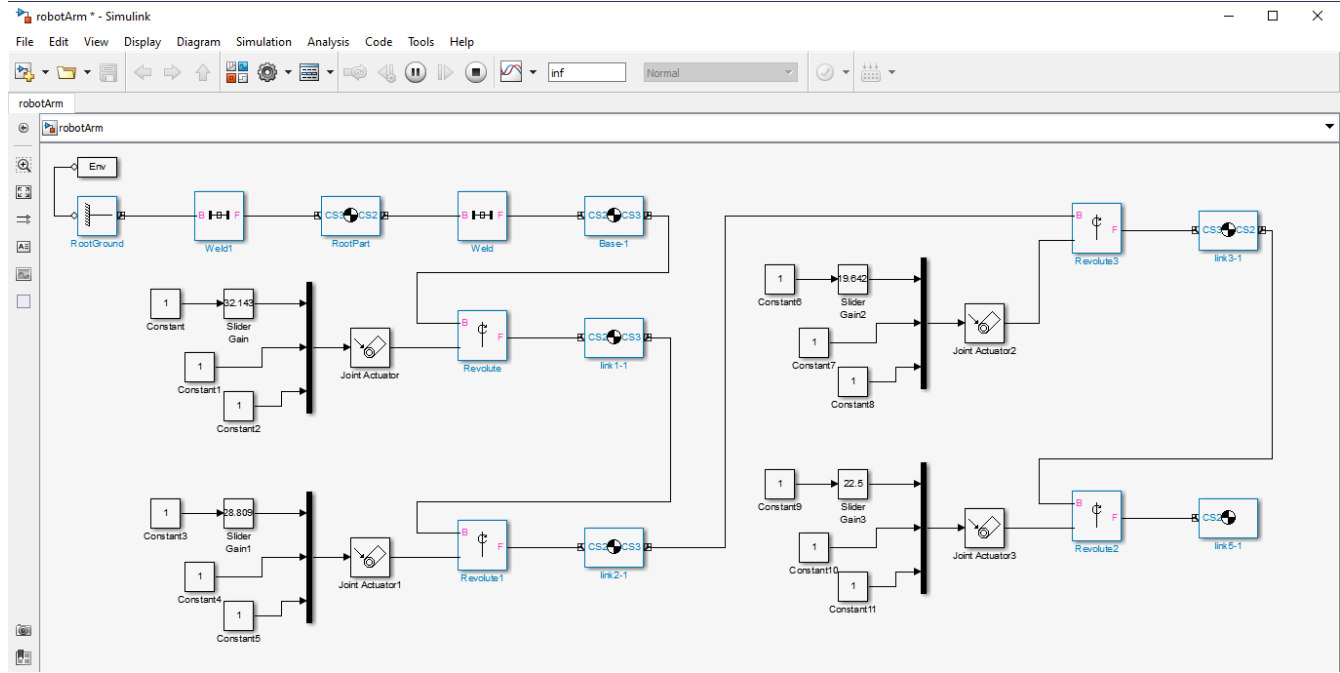
Şekil 4: Simulink üzerinden geliştirilen kontrol modülü

Hazırlanan simülasyon arayüzünde aşağıdaki fonksiyonlar yer almaktadır;

- Simülasyon sürecini kontrol etmek
- Eklem açısı bilgilerinin iletilmesi ve gözden geçirilmesi
- Manipülatörün son konum bilgilerinin alınması

5 serbestlik derecesine sahip profesyonel özellikteki robot kol, 3D yazıcıdan basılmış ve aynı zamanda açık

kaynaklıdır. Endüstriyel ölçekte kullanıma uygun olan robot kolun ileri ve ters kinematik analizi MATLAB yazılımı kullanılarak incelendi. Analiz aşamasında Simulink yazılımı kullanılarak GUI tasarlanmış ve robot kolun simülasyonu GUI aracılığıyla kontrol edildi. Simulink yazılımı üzerinde oluşturulan mekanik modelleme yapıldı. Mekanik modelleme aşağıdaki şekilde gösterilmektedir.



Şekil 5: Simülük ile robot kolun mekanik tasarımı

3.2. Elde edilen sonuçlar

Simulink üzerinden mekanik modellemesi yapılan robot kolda hareket ettirilen her eklem, kullanıcı tarafından belirlenen açısal değerler ile kontrol edilmektedir. Kullanıcı tarafından belirlenen açısal değerler Slider Gain ile mekanik modellemede yer alan Joint Actuator aktarılmakta ve hareket simülasyonu Revolute Joint ile sağlanmaktadır. Böylece gerçek hayatta yapılabilecek muhtemel hareketler var olan simülasyon üzerinden oluşturulabilmektedir. Simulink yazılımında modellemesi ve kontrol algoritmaları belirlenen robot kolun simülasyonu için gerekli olan bileşenler mekanizmaya uygulanmıştır.

Özellikle robotik sistemlerin tasarımı yapılırken öncesinde simülasyon yapılması genellikle çok kıymetlidir. Simülasyon kurulumu robotik sistemlerin tasarımında hem daha kolay, daha ucuz, daha hızlı ve kullanım noktasında da daha kolaydır. Özellikle robotik sistemlerin modellemeleri yapılsa ve deneyler yapılsa işlem birkaç saat sürer. Kinematik analizi yapılırken simülasyonun yapılmasının bir önemi de çalışma uzayının simülasyonda ortaya çıkartılır.

Simülasyon aşamasında robotik kurulum, gerçek robotlardan ve gerçek dünya kurulumlarından daha ucuz olsa da daha iyi tasarım değerlendirilmesini de sağlar.

Sonuç olarak simülasyon genellikle gerçek robotlardan daha hızlı çalışır ve tüm parametreler ekranda kolayca görüntülenebilir [15].

Simülasyonun önemi göz önünde alınarak, özellikle hazırladığımız geliştirilebilir açık kaynaklı mafsallı robot kolun Simulink sensörleri kullanılarak hazırlanan modül ile deneyi yapıldı. Simülasyon modülü üzerinde yapılan kinematik analizi incelemesi ve hazırlanan yazılım açık kaynak olarak hazırlandı. Tasarım sürecinin ilerleyen aşamalarında gerçek zamanlı simülasyonların icra edilmesi son derece önemlidir.

3D yazıcıdan basılabilir özelliği ile maliyetinin düşük olması ve dahi yukarıda bahsedilen diğer özellikleri robot kolun öne çıkan özellikleri arasındadır. Çalışma kapsamında COVID-19 gibi pandemik durumlarda özverili çalışan hastane personelinin iş yükünün azaltılması hedefleniyor. Çalışma alanının analizi robotik sistemler için kritiktir.

Özellikle hazırlanan çalışmanın önemi bir kez daha vurgulanırken, hastane ortamında salgın hastalıklar ile mücadele eden sağlık çalışanlarına yardımcı olacak en ufak bir etkinin önemi çok etkilidir. Çalışma kapsamında bir sonraki aşamada robot kolunun ileri ve ters kinematik analizi derin öğrenme yöntemleri ile incelenecek ve daha

işlevsel bir kontrol mekanizması elde edilmeye çalışılacaktır.

Örneğin görüntü işleme ve ses işleme metotları ile gelen sesli komutlar ile beraber istenilen objenin barkodu okunarak sağlık personeline teslim edilmesi gibi. Bu çalışmanın, açık kaynaklı robotik sistemlerin geliştirilmesi, yazılımlarının açık kaynak ve geliştirilebilmesi açısından paylaşılması, birden fazla robotik kol tarafından oluşturulacak robotik sistemlerin geliştirilmesine katkı sağlayacağı umulmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] A positioning paper by the International Federation of Robotics, Robots and the Workplace of the Future
https://ifr.org/downloads/papers/IFR_Robots_and_the_Workplace_of_the_Future_Positioning_Paper.pdf
- [2] J. Funda, R.H. Taylor, R.P. Paul, "On homogeneous transforms, quaternions, and computational efficiency," IEEE Trans. Robot. Automation 6, pages 382–388, 1990.
- [3] R. D. Klafter, T. A. Chmielewski and M. Negin. "Robotic Engineering: An Integrated Approach" 1989. Prentice Hall.
- [4] R K Mittal, J Nagrath. "Robotics and Control", 2005. Tata McGraw-Hill.
- [5] P. J. McKerrow. "Introduction to Robotics" 1991. Addison-Wesley.
- [6] S. B. Niku. "Introduction to Robotics: Analysis, Systems, Applications" 2001. Prentice Hall.
- [7] J. Denavit, R.S. Hartenberg, "A kinematic Notation for Lower- Pair Mechanism Based on Matrices." ASME Journal of Applied Mechanics, 215-221, 1955
- [8] S.R. Kuo, Y.B. Yang, "A rigid-body-qualified plate theory for the nonlinear analysis of structures involving torsional actions." Eng Struct 47:2–15, 2013
- [9] İnternet: <https://github.com/BCN3D/BCN3D-Moveo>, 10.06.220
- [10] M. Gouasmi, M. Ouali, B. Fernini, M. Meghatria, "Kinematic Modelling and Simulation of a 2-R Robot Using SolidWorks and Verification by MATLAB/Simulink", International Journal of Advanced Robotic Systems, DOI: 10.5772/50203, 2012
- [11] J.A. Velarde-Sanchez, S.A. Rodriguez-Gutierrez, L.G. Garcia-Valdovinos, J.C. Pedraza-Ortega, "5-DOF Manipulator Simulation based on MATLAB-Simulink methodology", DOI: 10.1109/CONIELECOMP.2010.5440751, 2010
- [12] W.L. Xiao, S. Henning, L. Torsten et. Al., "Closed-form inverse kinematics of 6R milling robot with singularity avoidance." Prod Eng Devel 5:103–110, 2011
- [13] Y. Wu, L.H. Cheng, G.H. Fan et al. "Inverse kinematics solution and optimization of 6-DOF handling robot" Appl Mech Mater 635–637:1355–1359. 2014
- [14] M.H. Fatehi, A.R. Vali, M. Eghtesad et. al., "Modeling and control of 3-PRS parallel robot and simulation based on SimMechanics in MATLAB." In: 2nd international conference on control, instrumentation and automation, Shiraz, December 2011
- [15] K. Raza, T. A. Khan, N. Abbas, "Kinematic analysis and geometrical improvement of an industrial robotic arm." Journal of King Saud University – Engineering Sciences 30 (2018) 218–223

Yüksek Gerilim Kablo Sistemleri için Arıza Erken Uyarı Sistemli Yeni Nesil Ekran Bağlantı Kutusu Geliştirilmesi

Development of a New Generation Intelligent Link Box (iLinkBox™) with Early Warning System for High Voltage Cable System

¹Sadettin Erdeniz, ²Abdollatif Bashghareh, ³Colin Smith



¹EM ELEKTRİK, İstanbul, 34959, Turkey, sadettin.erdeniz@emelec.com.tr

²EM ELEKTRİK, İstanbul, 34959, Turkey, abdollatif.bashghareh@emelec.com.tr

³IPEC Ltd, Manchester Science Park, M15 6SZ, United Kingdom, colin.smith@ipec.co.uk

Abstract

Link Boxes are integral accessories of HV/EHV cable systems. Any failure in link box proper performance can lead to failure of costly HV cable system. Sheath voltage limiter (SVL) failure, condensation and corrosion, water ingress and copper theft are among the cause of link box failures. Also link boxes are favourable point for partial discharge measurement of HV cable accessories and monitoring of bonding system's voltage/current. This paper presents development process of a new type of intelligent link box (iLinkBox™) with early warning system of different parameters including partial discharge in cable accessories, voltage/current of bonding system, water ingress, counter of impulses passing through SVL etc. iLinkBox™ will be able to continuously monitor the condition of link box and HV cable termination and joints then alarming unusual behaviours before the catastrophic failure.

Geniş Özet

Ekran Bağlantı kutuları (EBK) yüksek gerilim (YG) kablo sistemlerinin çok önemli bir parçasıdır. YG kablo ekranları özel bir biçimde bu kutuların içerisinde direkt olarak topraklanır, SVL (Sheath Voltage Limiters) (koruyucu parafudr) ile toprağa çaprazlama yöntemleri ile bağlanır. Kısa devre ve geçici aşırı gerilimlerden kaynaklı kablo sistemi arızalarında bağlantı kutusunun kritik rolü vardır. EBK'lar YG kablo ek veya başlıklarına yakın bir yerde yeraltı menhol de, beton bir kaide üzerinde veya tünel duvarına monte edilir. Sahadaki zor şartlar (bölgeye su basması, aşırı sıcak veya soğuk), montaj hatası veya üretim hatalarından dolayı bu panolar arızalanabilir. EBK'lar arızalandığı zaman yüksek gerilim kabloları da arızalanır; örneğin EBK içerisine su girişi olursa şayet, bakır baralarda paslanma meydana gelir, kontak dirençleri aratar ve bakır baralardan kısa devre akımı geçtiği zaman patlama meydana gelir ve topraklama sistemi çökmüş olur ve sonuç olarak yüksek gerilim kablo sistemi de arızalanır.

Ekran bağlantı kutularındaki olası hataları tespit etmek için çevrimdışı ve çevrimiçi yöntemler vardır. Çevrimdışı yöntemde kablo enerjisi kesilir ve her kutunun bakımı ekip tarafından yapılır (gözle muayene, DC dayanım testi, kontak direnç testi, SVL durum kontrolü vs.). Bu yöntemde belli bir aralıklarla (yılda bir defa) eğitimli bir ekip sahadaki tüm kutuların kontrollerini yapması gerekir. YG kablo güzergâh uzunluğu ve ekran bağlantı kutu sayısına göre bu iş çok uzun ve maliyetli olabilir. Ayrıca bu yöntemde her bakımdan sonra herhangi bir hata ortaya çıkarsa bir sonraki yıla kadar tespit edilemez. Çevrimiçi yöntemlerde ise kablo sistemin enerjisi kesmeden ekran bağlantı kutu durumu izlenebilir. Bu kapsamda bazı çalışmalar yapılmıştır (örneğin SVL kaçak akımını veya bonding sistemi akımlarını izleyerek).

Diğer yandan yüksek gerilim kablo ek ve başlıkların arıza tespitinde kullanılan kısmı boşalma (PD) ölçümü uzun zamandan beri kullanılmaktadır. Kısmi boşalma ölçümü yeni kurulan kablo sisteminde döşeme sonrası hataları (örneğin kesik, çizik, kirlenme gibi) tespit etmek için etkili bir yöntemdir. Halen hizmet vermekte olan mevcut kablo sistemlerinde yapılan kısmi boşalma ölçümü, yaşımda oluşan bozulmanın yararlı bir göstergesidir. Çevrimiçi kısmi deşarj ölçüm sistemleri (PDM) son zamanlarda EHV kablo sistemlerinde yaygın olmaya başlamıştır örneğin DEWA gibi iletim firmaları bu tip izleme sistemlerin kurulmasını zorunlu hale getirmiştir. Piyasada birçok ticari PDM sistemi olmasına rağmen bunların çoğu yüksek yatırım gerektirmektedir ve kurulumu ve işletimi ileri deneyimli personele ihtiyaç vardır. Ayrıca, şimdiye kadar, yüksek gerilim kablo sistemlerinin ayrılmaz bir parçası olan ekran bağlantı kutularına özel bir izleme sistemi geliştirilmemiştir. Bu çalışmada, ekran bağlantı kutusunun izlenmesi için ve yüksek gerilim kablo aksesuarlarının kısmi deşarj seviyesini ölçmek için ekonomik ve kullanımı kolay bir alarm sistemi geliştirilmeye hedeflenmektedir. Yeni arıza erken uyarı sistemli akıllı ekran bağlantı kutusu (iLinkBox™) sayesinde, YG kablo ekran akımı ve voltajı, darbe gerilim olayları, su girişi, sıcaklık ve nem, iç basınç, bağlantı kutusu kapak durumu ve yüksek gerilim kablunun kısmi deşarj seviyesi dahil olmak üzere çeşitli parametrelerini sürekli olarak izlenmesi mümkün olacaktır. SCADA sistemine entegre edilmiş basit kullanıcı arayüzü ve gelişmiş karar verme algoritmaları sayesinde, son kullanıcı karmaşık verilerle değil, yalnızca basit alarmlarla ilgilenir. Bu şekilde ekran bağlantı kutuları ve kablo aksesuarlarındaki olası arızalar çok ciddi hasarlara neden olmadan önce tespit edilir.

Anahtar kelimeler: YG kablo başlık ve ek, akıllı ekran bağlantı kutu, kısmi deşarj, bakım, izleme, topraklama sistemleri, dış kılıf parafudru.

1. INTRODUCTION

A sheath bonding system is a system to minimize the induced circulating current and to protect insulation of HV cable outer sheath against overvoltages from lightning, switching, and fault surges [1].

Link boxes are the enclosures in which bonding and grounding of sheaths of HV cable joints or terminations made through removable links. Link boxes also may contain sheath voltage limiters (SVL) to limit lightning or switching overvoltages. Link boxes are installed close to HV cable joints or terminations and may be installed in places such as underground manholes, aboveground structures/pedestals, or tunnel walls [2].

Any failure in link box proper performance can lead to failure of costly HV cable system [3]. The link box may fail due to exposure to the harsh environment, including moisture, heat, UV,

manufacturing defect, or mechanical impact. Common failures that can be inspected externally include corrosion, physical damages, and moisture ingress [1]. Some real cases of link box failures (including ingress of water into link box) leading to cable joint failure has been investigated in [4]. Many utilities would require that SVLs be housed in explosion proof link boxes to withstand short-circuit conditions. Some utilities have experienced some damage to their systems due to the failure of SVLs under short circuit conditions [5]. Inappropriate selection of SVL in bonding system is a main cause of link box failure and damage to sheath of EHV cable during short circuit and transient voltages [6]. Excessive sheath voltage limiters (SVL) failures were observed in at least three of the 275 kV circuits in National Grid network, which in turn led to extra cost, more frequent and longer maintenance interventions [7].

It may be more cost efficient to prevent failures with regular maintenance, than to perform corrective maintenance after a failure has occurred. CIGRE Working Group B1.50 [1] has listed some preventative maintenance methods of bonding systems. Offline methods (not energized cable system) including periodic visual inspection, contact resistance test, DC withstand test and SVL integrity tests are the common practices in HV cable industry. Online methods (energized cable system) including measuring sheath currents, fiber optic embedded SVL monitoring or measuring SVL leakage current, use of DTS (Distributed Temperature Sensing) data to check condition of bonding system, visual or thermal images have been used in some practices. Some works such as [8] and [9] have discussed sheath current monitoring to diagnosis of HV cable faults.

On the other hand, PD detection is the best method for XLPE cable insulation condition evaluation recommended by experts and scholars all over the world, IEEE, IEC, CIGRE and other international power authority organizations [10]. Online PD monitoring of EHV cable systems has received more attention in recent years. Some utilities like DEWA now requires continuous real time PDM (partial discharge monitoring) system in 400 kV cable systems [11].

There are many commercial monitoring systems (specially PDM systems) available in market but most of them suffer from high cost, complexity of installation & operation and need to highly experienced staff to operate whole system and interpret the collected data. Also, up to now, there is no special monitoring system for link boxes which are integral part of HV cable systems. This work has been started to develop an economic, simple-to-operate & install alarm system for the link box itself and partial discharge level of HV cable terminations and joints.

2. DEVELOPMENT OF iLinkBox™ COMPONENTS

2.1. Partial Discharge Sensors

Two types of partial discharge sensors were specially designed for this study. The First sensor is an insulator type PD sensor with built-in HV divider [2]. As can be seen in Fig.1 (a) this sensor contains a soft ferromagnetic core with primary and secondary winding to pick up PD signals from copper busbars of link box connected to high voltage cable screen. This sensor also contains a HV voltage divider for measuring induced voltages in bonding system. This output also can be used to provide synchronization signals for PD measuring board. Also, output of this divider can be used for counting number of lightning impulses passing through SVLs inside link boxes so condition monitoring of SVL is possible. These insulator type sensors are mounted below copper busbars of link box instead of common support insulators. Special attention was made to design the sensor to meet the High voltage requirements of link boxes, e.g.

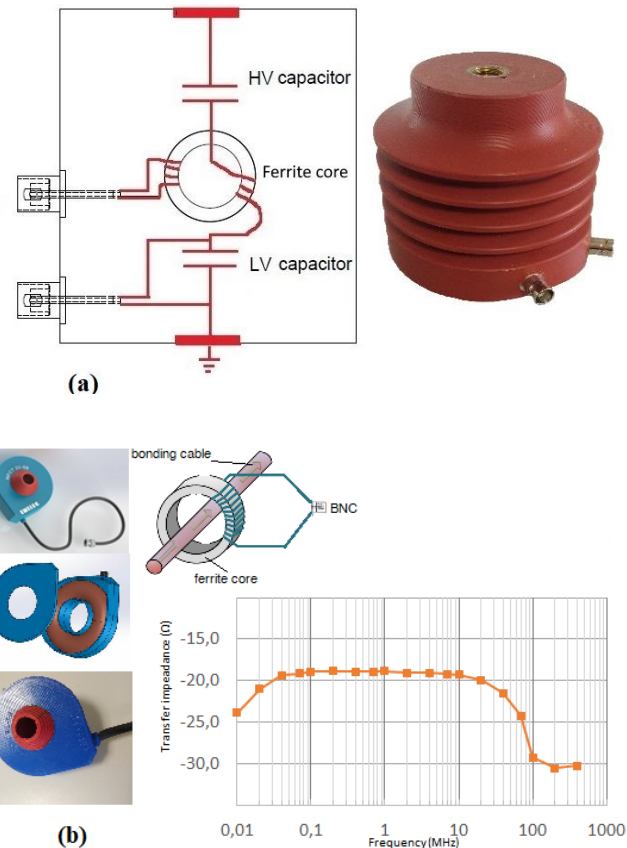


Fig. 1: Partial discharge sensors: (a) insulator type PD sensor with built-in voltage divider (b) HFCT

not having metallic parts near energized parts that can affect lightning performance of link box.

The 2nd sensor which has been designed is a HFCT type PD sensor as shown in Fig. 1 (b). High frequency current transformers (HFCTs) are widely used as sensors in PD detection and monitoring systems applied to HV equipment [12]. Some aspects of these sensors for PD measurement in different apparatuses are described in literatures like [13]- [15].

This sensor is needed in some of direct earthing link boxes which only inductive PD sensing is available and type (a) PD sensor cannot be used (only HV divider part of sensor will be used). Designed special HFCT for current project has large internal diameter ($\phi 44\text{mm}$) makes it applicable for different size of bonding cables. A silicone plug is used to fix the sensor to wide range of bonding cables. The sensor is constructed with a copper body to provide RF shielding and improved performance in noisy environments. Specially designed ferrite core and primary and secondary windings provides a high-performance partial discharge sensor for range of 0.4-20 MHz. Wide frequency response of the sensor, low background noise, tight installation around bonding cables (thanks to its flexible silicone ring embedded in internal part) and not having metallic parts (that can affect HV performance of link box) are the advantage of this type of PD sensor.

2.2. AC Current measuring sensor

A 20/0.1 ratio epoxy current transformer has been designed to measure the induced currents circulating inside link boxes so sheath current monitoring of bonding system will be made. Any increase or unbalance in sheath currents now will be monitored. These sensors are mounted around bonding cables inside link box and are designed to measure the sheath currents during normal operating of

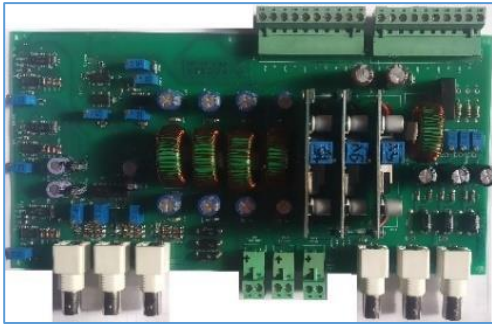


Fig. 2: Current & Voltage Measuring and Pulse Counting Board

bonding system and abnormal conditions (e.g. SVL failure that can lead to increased or unbalanced currents).

2.3. Other Sensors

There are other useful sensors inside iLinkBox to monitor the condition of link box:

- A water sensing sensor to detect water ingress into link box,
- A temperature & humidity sensor that can be used to evaluate condensation issues or other abnormal condition,
- A switch embedded in lid of link box to show the open/close statues of lid, this data can be used to check the unauthorized opening of link box.
- A Pressure sensor to detect any increase of internal pressure of link box due to internal arc,

All output data of these sensors are directly sent to main processing unit (MPU) of iLinkBox.

2.4. Current-Voltage Conditioning and Pulse Counting Board

An analog conditioning board was developed to convert received signals from AC HV voltage divider and AC current measuring sensors to readable data for main processing unit (MPU):

- AC Output signals of insulator type voltage divider are connected to three input channels of conditioning board. The input signals are passed from a protection circuit to where they are amplified to increase the accuracy of measurements. Finally, the signals are rectified to be read via main processing unit (MPU).
- output signals of voltage divider are also sent to a comparator and pulse generation circuit to generate signals to be read via counter in main processing unit (MPU). All impulses exceeding specified level are counted as an impulse incident. This circuit enables the iLinkBox to count the number of impulses voltages due to incident of lightning/switching or fault surges in bonding system so condition monitoring of SVL will be possible.
- AC out signals of current measuring sensors are connected to three input channels of conditioning board. After passing from a protection circuit, signals are rectified to be read via main processing unit (MPU). Any change in AC current in bonding system (e.g. SVL failure) can be detected.

The conditioning board also contains a synch voltage selection circuit to provide appropriate synch signal for PD measuring board (synch voltage will be selected from bonding system voltage or current). It also contains SMPS voltage regulators to regulate the DC power supply of all components (with different supply voltage level). A LC type low pass filter has been added to reduce the noise level of power supply circuit. Two-layer PCB mounted board can be seen in Fig.2.

2.5. Partial Discharge Measuring Board

The PD measuring board has three input channels connected to the insulator type PD sensors or HFCT sensors. An input protection stage is followed by signal conditioning, filtering, and amplification



Fig. 3: PD measuring board including 3 input channels, a input sync. channel

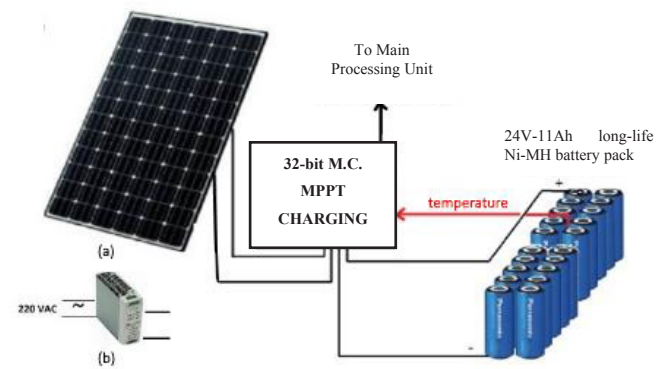


Fig. 4: power supply system, (a) charging from solar panel, (b) charging form street lighting line

of the high frequency partial discharge signals from PD sensors (Fig.3). Signal sampling and processing is done by an i.MX28 processor running Linux . It also receives the synch signal from the conditioning board to synchronize the measured PD signals with AC voltage of bonding system. The board includes an ethernet output port to communicate with main processing unit (MPU). Special attention has been made to develop a noise discrimination algorithm to reduce the false alarming due to received background noise.

2.6. Power supply system

Providing energy for all electronic components is critical for a reliable system. After consulting with different customers and considering target project requirements, a battery storage system charging from solar panel or street lighting line has been selected. This system can be seen in Fig.4. A 32-bit ARM microprocessor was programmed to charge the 24V-11 Ah durable Ni-MH battery with specialized algorithms to ensure long life operation of battery pack (at least 10 year). MPPT (Maximum Power Point Tracker) algorithm was used in case of solar charging.

2.7. Main Processing Unit (MPU)

An ARM Cortex M type microcontroller (which is low-cost and energy-efficient) has been selected to process all incoming data from sensors, conditioning board and partial discharge measuring unit. An advanced decision-making algorithm for alarming has been embedded in this unit. Alarming algorithms and triggering levels can be customized in SCADA user interface according to project specifications. Two remote data communication methods (between on-site iLinkBox and SCADA database in control center) has been selected in this project according to target project requirements. A fiber optic communication method can be used when the project owner can allocate a FO line for alarming system (new cable projects). If this option is not feasible then a wireless GSM/GPRS communication method can be used for iLinkBox. In

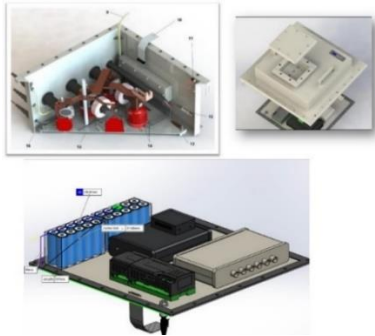


Fig. 5: design details of iLinkBox and layout of components inside

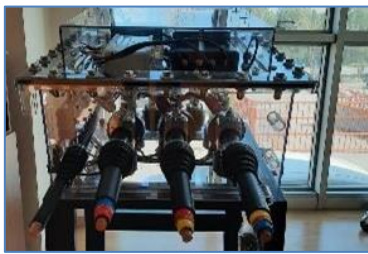


Fig. 6: iLinkBox™ prototype

this method it is necessary to install an antenna outside of link box where the GSM signals can be reached. It is to be noted that an energy saving plan has been used in this project. Data communication operations can increase the energy consumption, so intervals of data sending to SCADA database from each iLinkBox has been increased to one hour in this project.

3. MECHANICAL DESIGN OF iLinkBox™

Mechanical design of link box body and lid was made to meet all requirements of international and national standards. AC/DC withstand levels, impulse voltage withstand level, IP class and other requirement of project has been considered in this process.

Fig.5 shows the schematic view of designed link box. All sensitive electronic components have been placed in upper separate compartment in lid of link box to be isolated (shielded) from HV side of link box (lower compartment). All electronic components

are mounted on a removable baseplate in upper compartment. All sensor output cables are entering a junction box on wall of lower compartment. All signal lines are protected by surge protection devices inside junction box. Connection between upper compartment (electronic devices) and junction box made via a multiple core signal as well as a fiber optic cable. By removing these cables, the lid of link box (as well as all electronic devices) can be pulled out for any setting or maintenance work on site. There is small terminal box on top of upper compartment. There are three PD output in this terminal box as well as a synch output for local partial discharge measurement on site. This option is useful to perform deep investigations of partial discharge measurements when an alarm has been received from iLinkBox.

4. DEVELOPED iLinkBox™ PROTOTYPE

Fig.6 shows a prototype of current project. Also overall logic of iLinkBox system has been shown in Fig.7. Prototype iLinkBox has been exposed to some functional and type tests in factory environment to evaluate its performance before on-site pilot tests. 20/25 kV AC/DC tests, contact resistance tests and other link box type tests have been applied successfully. Also some functional

tests including battery system check-up, functionality of different sensors & alarms and communication check-up have been done in SCADA screen.

5. CONCLUSION

iLinkBox™ can be used to continuously monitor & alarm different parameters of link box including current & voltage of sheathes, number of impulse voltage incidents, water ingress, temperature & humidity, internal pressure, link box lid status, and partial discharge level of HV cable accessories. Thanks to embedded advanced decision-making algorithms, final user will only deal with simple alarms not complex data. Simple user interface integrated to SCADA system enables the operator to receive alarms concerning unusual behaviour before catastrophic failure of link boxes and cable accessories.

6. REFERENCES

- [1] CIGRE Working Group B1.50, "Sheath bonding systems of AC transmission cables- design, testing, and maintenance", report no 797, March 2020.
- [2] Sadettin Erdeniz, "Link box with built-in insulator type voltage divider and inductive partial discharge sensor", WIPO (PCT) report WO2019194754A1, 2018.
- [3] Sadettin Erdeniz, "Link box with built-in partial discharge sensor", WIPO (PCT) report WO2016190823A1, 2015.
- [4] Xiang Dong, Yanling Yuan, Zhongqiang Gao, Chengke Zhou, Peter Wallace, Babakalli Alkali, Bojie Sheng, Hao Zhou, "Analysis of Cable Failure Modes and Cable Joint Failure Detection via Sheath Circulating Current", IEEE Electrical Insulation Conference (EIC), 2014.
- [5] CIGRE Working Group B1.18, "Special Bonding of High Voltage Power Cables", report no 283, 2005.
- [6] Aarsh Illbeygi, Hadi Aliabadi, "Simulation and analysis of sheath voltage limiter failure in undergrounded cable transmission line in Mashhad city", 29th International Power System Conference, 2014.
- [7] F Ghassemi, "Effect of Trapped Charges on Cable SVL Failure", International Conference on Power Systems Transients (IPST), 2013.
- [8] Mingzhen Li, Wenjun Zhou, Chunlin Wang, Leiming Yao, Mengting Su, Xiaojun Huang, Chengke Zhou, "A novel fault localization method based on monitoring of sheath current in a cross-bonded HV cable system", Sensors Journal, 2018.
- [9] Chengke Zhou, Yang Yang, Mingzhen Li, Wenjun Zhou, "On-line Monitoring and Diagnosis of HV Cable Faults by Sheath System Currents", IEEE Transactions on Power Delivery Volume: 32, Issue: 5, 2017.
- [10] Yangchun Cheng, Li Zhao, Xutao Wu, Hui Ni, Pei Ding, Xiuguang Li, Xiu Zhou, "Statistical Analysis of Partial Discharge Faults of HV Cables", 2020 Electrical Insulation Conference (EIC), June 22 – July 03, 2020.
- [11] DEWA 400 kV XLPE Cables and Accessories Specification, doc no 1.5.1.3.1.01-Rev 2, 2015.
- [12] Xiao Hu, W. H. Siew, Martin D. Judd, "Transfer Function Characterization for HFCTs used in Partial Discharge Detection", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Volume: 24, Issue: 2, April 2017.
- [13] J. Singsathien; T. Suwanasri; C. Suwanasri; S. Ruankon; P. Fuangpian; W. Namvong; P. Saengsaikaew; W. Khotsang, "Partial discharge detection and localization of defected power cable using HFCT and UHF sensors", 2017 14th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer,

Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON).

- [14] L. C. Castro Heredia; A. Rodrigo Mor, ‘HFCT-based Detection of Partial Discharge Currents on GIS Enclosures’, 2019 2nd International Conference on Electrical Materials and Power Equipment (ICEMPE).
- [15] N. H. Md Rahim; M. H. Ahmad; Z. Nawawi; M. A. B. Sidik; M. I. Jambak, ‘Partial Discharge Detection using Developed Low-cost High Frequency Current Transformer’, 2019 International Conference on Electrical Engineering and Computer Science (ICECOS).

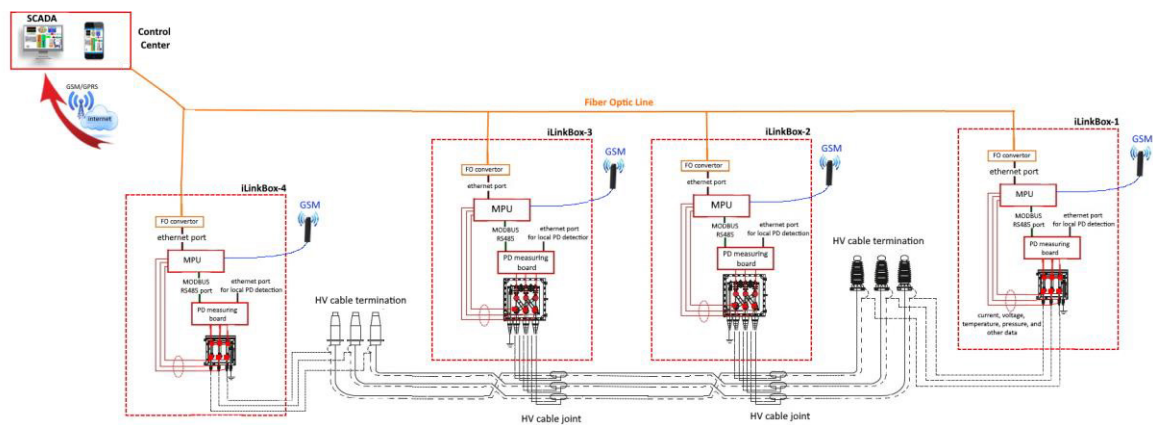


Fig. 7: Overall structure of iLinkBox alarming system for a sample Project

Sadettin ERDENİZ



Sadettin ERDENİZ, 1971 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi/İstanbul Elektrik Mühendisliği fakültesinden Güç Elektrik bölümünden Elektrik Mühendisi olarak mezun olmuştur. 1974-1999 Yılları arasında; Türk-Siemens ve Demirer Kablo firmalarında; XLPE izoleli Yüksek Gerilim kablo üretimi, Yüksek Gerilim kablo sistemleri projelendirilmesi, ek/başlık aksesuarlarının saha montajları ve saha testlerinde üst düzey yönetici olarak çalışmıştır. 1999 Yılında EM Elektrik firmasını kurmuştur ve halen de yönetim kurulu başkanlığı ve genel müdürlük görevini sürdürmektedir. Bir yayınlanmış makalesi olup 2 TÜBİTAK projede yürütücü olarak görev almıştır. Şu anki araştırma alanları arasında Yüksek Gerilim kablo aksesuarları geliştirme ve yüksek gerilim test ve ölçüm sistemleri yer almaktadır.

Abdollahif BASHGHAREH



Abdollahif BASHGHAREH, 2006 yılında İran Power and Water University of Technology Üniversitesinden Elektrik-Elektronik Mühendisliği fakültesinden mezun olmuştur ve 2009 yılında Yüksek Lisans diplomasını İran University of Science and Technology (IUST) üniversitesinden almıştır. 2009-2014 yıllar arasında Niroo Research Institute firmasından proje müdürü olarak görev almıştır. 2014 yılından bu yana EM Elektrik firmasında ARGE ve test mühendisi olarak çalışmaktadır. 5 yayınlanmış makalesi olup araştırma alanları arasında kısmi deşarj ölçüm sistemleri, Yüksek Gerilim test ve ölçüm sistemleri, güç sistemleri analizi ve topraklama sistemleri hızlı geçici olayların analizi yer almaktadır.

Dr. COLIN SMITH



Dr. Colin SMITH, received the Bachelor's Degree in Electronics and Electrical Engineering from University of Manchester in 1990 and Ph.D degree in 1993. In 1995, he joined the IPEC company as managing director up to now. With 19 publications his is currently involved in research in the fields of Partial Discharge (PD), development of test and permanent monitoring equipment for HV cables and switchgear, partial Discharge signal analysis and diagnostics.

Covid-19 Sürecinin Enerji Tüketim Alışkanlıklarına Etkileri: Kahramanmaraş Örneği

Effects of Covid-19 Process on Energy Consumption Habits: The Case of Kahramanmaraş

Hasan BEYHAN¹, Gizem EREN², Fatma AVLİ FIRIŞ³



¹Başarsoft Bilgi Teknolojileri A.Ş., Ankara, Türkiye, hasan.beyhan@basarsoft.com.tr

²Başarsoft Bilgi Teknolojileri A.Ş., Ankara, Türkiye, gizem.eren@basarsoft.com.tr

³AKEDAŞ Elektrik Dağıtım A.Ş., Kahramanmaraş, Türkiye, fatma.avlifiris@akedasdagitim.com.tr

Öz

Eski çağlardan beri yaşanan büyük dönüşümlerin incelenmesi yapıldığında, en önemli nedenin insanlığın bir bütün olarak yaşadığı büyük krizler olduğu görülmektedir. Günümüzde de böyle bir krize neden olup tüm dünyayı etkisi altına alan Covid-19 salgını neticesinde üç temel fikir ortaya atılmıştır. Bu fikirler; salgının yalnızca sağlık sistemi açısından değil tüm boyutlarda etkiler bırakacağı, salgın sonrası eskisi gibi hiçbir şeyin olmayacağı ve yeni hayatta yeni normallerle devam edileceğidir. Bu fikirlerin beraberinde getireceği sorgulamalar ile birçok şeyin değişime uğrayacağı yadsınamaz bir gerçekliktir. Uğranacak bu değişimler arasında, insanların temel ihtiyaçları haline gelen elektrik enerji ihtiyaçları da önemli bir yer tutmaktadır. Bu çalışmada, Covid-19 salgını ile değişen elektrik tüketim alışkanlıkları tematik harita bazlı olarak incelenmiştir. Çalışma kapsamında, coğrafi bilgi sisteminden alınan veriler yardımıyla Kahramanmaraş ilindeki çeşitli abone gruplarındaki enerji tüketim değişimleri ele alınmış, tüketim verilerinin değişimleri, mahalle kırınımlı olarak haritalar üzerinde gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Covid-19, Coğrafi Bilgi Sistemi (CBS), Elektrik Enerjisi Tüketimi, Tematik Harita

Abstract

When examining the great transformations that have taken place since ancient times, it is seen that the most important reason is the great crises experienced by humanity as a whole.

Today, as a result of the Covid-19 epidemic, which caused such a crisis and affected the whole world, three basic ideas were put forward. These ideas; The epidemic will have effects not only on the health system, but on all dimensions, after the epidemic, nothing will happen as before and new normals will continue in the new life. It is an undeniable reality that many things will change with the questions these ideas will bring along. Among these changes to be faced, electrical energy needs, which have become the basic needs of people, also have an important place. In this study, electricity consumption habits that changed with the Covid-19 outbreak were examined on a thematic map basis. Within the scope of the study, energy consumption changes in various subscriber groups in Kahramanmaraş province were handled with the help of the data obtained from the geographic information system, and the changes in consumption data were shown on maps with neighborhood diffraction.

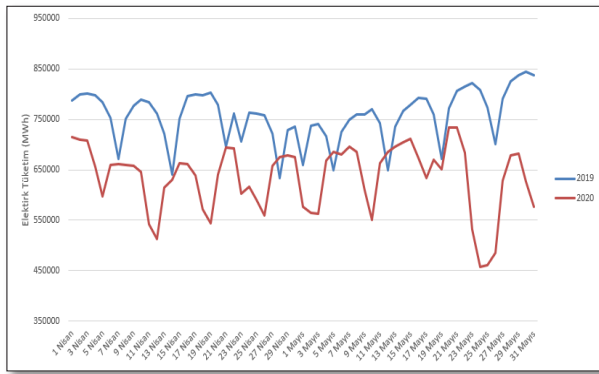
Keywords: Covid-19, Geographical Information System (GIS), Electrical Energy Consumption, Thematic Map

1. Giriş

Dünya Sağlık Örgütü tarafından 5 Ocak 2020 tarihinde yeni bir koronavirüs tespit edilmiştir. "Covid-19" olarak isimlendirilen hastalık, Çin'de ortaya çıktıktan yaklaşık 3 ay sonra dünyayı etkisi altına almıştır [1]. Hastalık, yine Dünya Sağlık Örgütü tarafından 30 Ocak 2020 tarihinde "Uluslararası boyutta Halk Sağlığı Acil Durumu" olarak, 12 Mart 2020 tarihi itibarıyla ise "Pandemi" olarak ilan edilmiştir [2]. Küresel salgın, sosyal, fiziksel ve ruhsal yönden insanlığı tehdit etmeye başlamıştır ve devam etmektedir.

Covid-19 salgınının dünya çapında ciddi ekonomik sonuçları olmuş ve neredeyse tüm ülkeler bu durumdan etkilenmiştir. Etkiler sadece ekonomik açıdan değil toplum bazlı da olmuş, bu da işletmelerin ve tüketicilerin davranışlarında önemli değişikliklere yol açmıştır [3]. Salgın, dünya genelindeki toplumlarda insan yaşamının gidişatı hakkında temel varsayımları sarsmaktadır. Salgının sağlık, kişisel kontrol ve planlama, sosyal ilişkiler ve aile, eğitim, iş ve kariyer, göç ve hareketlilik gibi alanlara etkilerinin olduğu görülmektedir. Covid-19 salgınının bireyler ve toplumlar üzerinde sosyal, ekonomik, kültürel ve psikolojik sonuçları olduğu gözlemlenmektedir. Pandeminin yarattığı ani şok ile fiziksel uzaklaşma önlemlerinin yarattığı hareket kısıtlamaları insanlar arasındaki ilişkileri sarsmıştır [4]. Bu minvalde yaşadığımız dünyanın şeklinin bu salgın nedeniyle çarpıcı bir şekilde değişeceği öngörülmektedir. Şu anda pandemiye dönüşen Covid-19 salgınına karşı ülkelerin aldığı önlemler, bu küresel sağlık krizi sürecinde ekonomik sıkıntıları da ortaya çıkartmaktadır [5].

Türkiye'nin 2020 yılı günlük elektrik tüketimine bakıldığında pandemi öncesindeki tüketimlerle pandemi sonrası alınan önlemlerin neticesindeki tüketimlerde büyük farklılıklar görülmektedir. 2020 yılının başlarında, Covid-19 vakalarının ülkemizde henüz görülmediği aylar olan Ocak ayında elektrik enerjisi tüketiminde %3'lük bir artış görülürken Şubat ayında %7'lik bir artış görülmüştür. Ancak Covid-19 vakalarının ülkemizde de görülmeye başladığı Mart ayında ve pandemiye dair önlemlerin artırıldığı Nisan ayında elektrik enerjisi tüketiminde neredeyse daha önce hiç görülmemeyen düşüşler yaşanmıştır. Düşüşlerin yaşanmasında, ülke yönetimi tarafından alınan birçok işletmenin kapatılması kararı ve birçok sosyal platformdan da duyurulan 'evde kal' çağrıları etkili olmuştur [6].



Şekil 1. 2019-2020 Yılları Nisan ve Mayıs Ayı Elektrik Enerjisi Tüketimi

Şekil 1'de TEİAŞ YTBS günlük istatistiklerinden derlenerek 2019-2020 yılları Nisan ve Mayıs ayları için günlük hazırlanmış elektrik enerjisi tüketim değişimi görülmektedir. Grafikten de yine Covid-19 salgınının 2020 yılındaki elektrik enerjisi tüketim verilerine doğrudan etkisi açıkça görülmektedir [7].

2. Materyal ve Metod

Elektrik Dağıtım Bilgi Sistemi (EDABİS); Abone Bilgi Sistemi (ABS), Merkezi Kontrol ve Veri Toplama Sistemi (Supervisory

Control And Data Acquisition/SCADA) ve Çağrı Merkezi (ÇM), gibi bilgi sistemlerine dayalı uygulamalarla entegre halde çalışabilecek ve bu sistemlerle uyumlu çalışabilmesi için özel geliştirilmiş ve Coğrafi Bilgi Sistemi (CBS) tabanlı altyapı dağıtım bilgi sistemidir [8].

EDABİS, abone dağılım raporu, elektrik tüketim raporu ve tematik tüketim haritası gibi raporlama ve gelişmiş sorgulama yeteneğine sahip bir uygulama olup abone bilgilerini ABS'den almakta, ABS'deki veriler ise canlı olarak sürekli bir şekilde görüntülenmektedir. Şebeke üzerindeki değişikliklerde ve abone üzerindeki konum değişikliklerinde abone bilgilendirilerek aboneye ait şebeke bilgileri güncellenmektedir. ABS adreslerin tümünü CBS'den almakta ve Coğrafi Adres Veri Tabanı denilen yapı oluşmaktadır.



Şekil 2. Uygulama Adımları İş Akışı

Kahramanmaraş iline ait mahalle bazlı tüketim verilerinin elde edilmesinde, AKEDAŞ Elektrik Dağıtım A.Ş. elektrik enerjisi tüketim verileri ile EDABİS yazılımı araç olarak kullanılmıştır. Elde edilen coğrafi veriler üzerinden yapılacak tematik analizler sonucunda hazırlanan tematik haritalar için Başarsoft Bilgi Teknolojileri A.Ş. tarafından geliştirilmiş olan EDABİS yazılımı kullanılmıştır. Çalışma kapsamında yer alan uygulama adımlarının iş akışı Şekil 2'de görülmektedir.

Veriler ortalama olarak ay bazında alınmış ve çalışmada kullanılmıştır. Toplamda 2 ay olarak analiz yapılmıştır. 2019 ve 2020 yılları içerisindeki Nisan ve Mayıs aylarına ait mahalle bazlı tüketim verileri ile kullanım alanlarına göre sınıflandırılmış tüketim verileri (mesken, sanayi, tarımsal sulama, ticarethane) çalışmada kullanılmıştır.

Çalışmada Başarsoft Bilgi Teknolojileri A.Ş. tarafından üretilen mahalle bazlı idari sınır verileri kullanılmıştır. İdari sınır verilerinden Kahramanmaraş iline ait güncel mahalle bazlı coğrafi alanları ile AKEDAŞ tarafından sağlanan Kahramanmaraş iline ait abone tüketim verileri, mahalle bazlı coğrafi alanlara işlenerek, aydınlatma, mesken, sanayi, tarımsal sulama ve ticarethane kırımlarında mahalle bazlı tematik analizler yapılmış ve görselleştirilmiştir. 2019-2020 yılları nisan ile mayıs ayları elektrik enerjisi tüketim verileri karşılaştırmalı olacak şekilde sunulmuştur.

AKEDAŞ tarafından sağlanan Kahramanmaraş iline ait mahalle bazlı abone elektrik tüketimi verileri içerisinde bulunan eksi değerler ortalamaya çekilmiş, 2019- 2020 yılı Nisan-Mayıs ayları abone tüketim verileri arasındaki değişim farkı hesaplanmıştır. Başarsoft tarafından üretilen mahalle bazlı idari

sınır verileri ile AKEDAŞ tarafından paylaşılan Kahramanmaraş iline ait abone tüketim verileri eşleştirilmiştir. Toplamda 702 mahalle içerisinde 685 adet mahalleye ait tüketim verileri kullanılmıştır. İdari sınır verilerinden Kahramanmaraş iline ait güncel mahalle bazlı coğrafi alanlar ile eşleşen AKEDAŞ abone bazlı elektrik tüketim verileri için EDABİS yazılımı üzerinde 2019 ve 2020 yılları Nisan ve Mayıs ayları abone bazlı elektrik tüketim değişimi abone grupları da göz önünde bulundurulur (Mesken, Ticarethane, Sanayi, Tarımsal Sulama, Aydınlatma ve Genel Aydınlatma) verilerinin tematik analizi yapılmış ve yorumlanması için veriler ayrı ayrı haritalandırılmıştır. Tablo 1’de elektrik tüketim verilerinin ve idari sınırların kapsamı yer almaktadır.

Tablo 1 Veri Tablosu

Ana Kırılım	Veriler	Kaynakları	Abone Grubu (2019 ve 2020/Nisan ve Mayıs)
Mahalle Bazlı Tüketim Verileri	Aydınlatma	AKEDAŞ	Aydınlatma
	Genel Aydınlatma	AKEDAŞ	Genel aydınlatma
	Mesken	AKEDAŞ	Mesken
	Sanayi	AKEDAŞ	Sanayi
	Tarımsal Sulama	AKEDAŞ	Tarımsal sulama
	Ticarethane	AKEDAŞ	Ticarethane
Mahalle Sınırları	Coğrafi Mahalle Alan Verileri	Başarsoft	

3. Bulgular

Bu araştırma için seçilen çalışma alanı, Kahramanmaraş ilinin AKEDAŞ Elektrik Dağıtım bölgesidir. 01 Ocak 2011’de hizmete başlayan AKEDAŞ, Adıyaman ve Kahramanmaraş illerinde hizmet vermeye başlamış Elektrik Dağıtım Şirkettir. AKEDAŞ Elektrik Dağıtım A.Ş. Adıyaman’da yaklaşık olarak 240.000, Kahramanmaraş’ta ise yaklaşık olarak 450.000, müşteriye hizmet vermektedir. Her iki şehirde de müşterilerin %10’ unu ticarethaneler oluşturmaktadır. Üretim faaliyetleri için Adıyaman’da 500, Kahramanmaraş’ta 700 sanayi tesisine elektrik enerjisinin hatlar üzerinden ulaşımı sağlanmaktadır. Bu bölgenin seçilmesindeki amaç Covid-19 döneminde ortaya çıkan enerji tüketimi farklarının, AKEDAŞ tarafından sağlanan Kahramanmaraş iline ait abonelerin 2019-2020 Yılları Nisan-Mayıs aylarına ait gerçek tüketim verilerinin abone tür ve tarifleri ile birlikte yorumlanması ve analiz edilmesidir.

Tablo 2’de 2019-2020 yılları Nisan ve Mayıs Aylarına ait abone grupları bazında aylık toplam elektrik tüketim verileri yer almaktadır. Covid-19 sürecinin etkileri elektrik tüketiminin toplamının yer aldığı tabloda açıkça görülmektedir.

Tablo 2.2019 ve 2020 Yılları Nisan ve Mayıs Ayları Yıllık Tüketim Verileri*

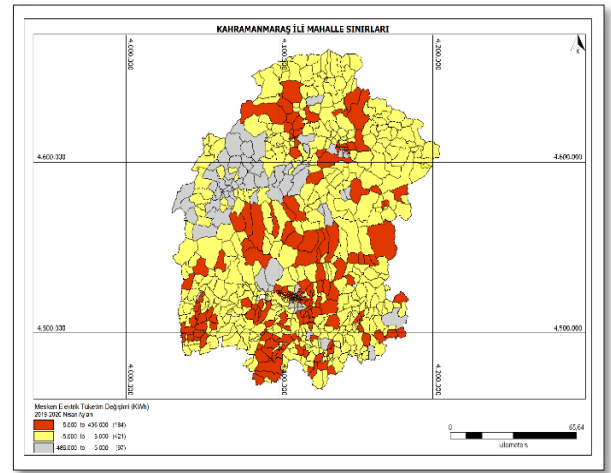
Abone Grubu	2019 Yılı		2020 Yılı	
	Nisan (MWh)	Mayıs (MWh)	Nisan (MWh)	Mayıs (MWh)
Mesken	40.182	40.772	42.694	42.038
Ticarethane	40.268	41.227	26.605	26.172
Sanayi	121.632	117.982	53.326	65.282
Tarımsal	1.377	2.002	1.459	3.117

Genel Aydınlatma	4.646	4.816	4.300	4.295
Aydınlatma	358	426	208	286

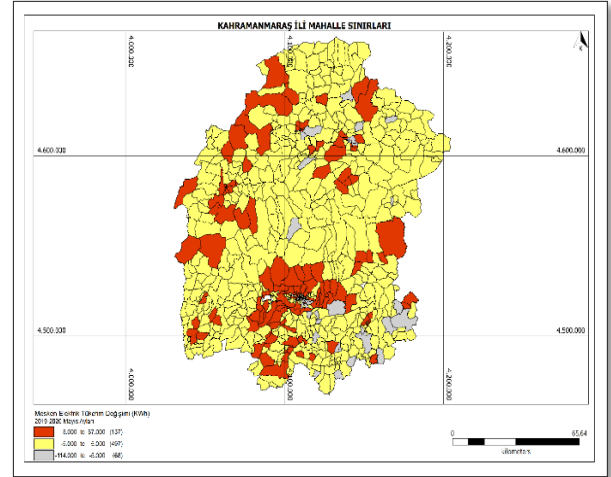
* Rakamlar AKEDAŞ Savaş Okuma Sistemi verileri üzerinden küsuratlar atılarak hesaplanmıştır.

2019 yılı Nisan ve Mayıs ayları ile 2020 yılı Nisan ve Mayıs ayları için Kahramanmaraş iline ait mahalleler üzerinden abone grubu bazında hesaplanmış elektrik enerjisi tüketim değişimi verileri kullanılarak tematik haritalar üretilip alt başlıklar halinde sunulmuştur. Haritalar, her bir abone grubu için ayrı ayrı üretilip yorumlanmıştır.

3.1. Mesken Aboneleri



Şekil 3. 2019 ve 2020 Yılları Nisan Ayı Tüketim Değişimi Haritası



Şekil 4. 2019 ve 2020 Yılları Mayıs Ayı Tüketim Değişimi Haritası

Şekil 3 ve Şekil 4’de yer alan mesken abone gurubu elektrik tüketim değişim verisi mahalle bazlı haritalar üzerinden incelendiğinde mesken aboneleri için elektrik tüketimindeki artış göze çarpmaktadır. Özellikle merkez mahallelerdeki yaşam alanının ve nüfusun fazla olduğu bölgelerdeki artış haritadan görülebilmektedir. Nisan ayında 184 mahallede, Mayıs ayında 137 mahallede 5.000 KWh’in üzerinde elektrik tüketimi artışı olmuştur. Mayıs ayında artırılan Covid-19 önlemleri neticesinde Mayıs ayındaki artışın rakamlarının Nisan ayına göre daha fazla olduğu da görülmüştür. Tablo 3 ve

Tablo 4’de ise geçmiş yıla göre en fazla elektrik tüketim artışı gösteren 5 mahalle ve tüketim değerleri paylaşılmıştır.

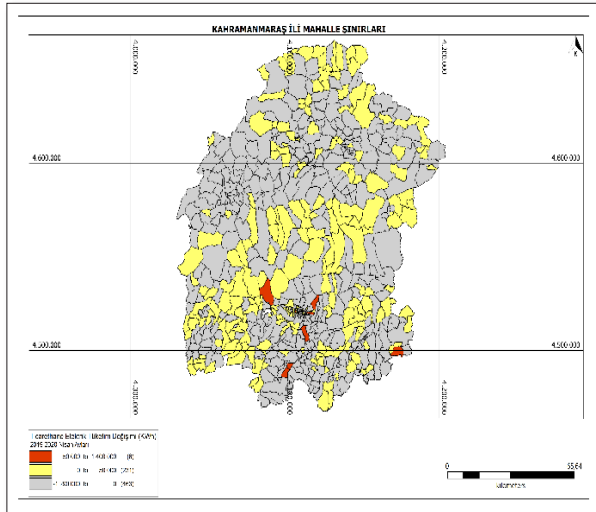
Tablo 3. 2019 ve 2020 Yılları Nisan Ayı Tüketimi En Fazla Artan Mahalleler

Mahalle Adı	İlçe Adı	Değişim (KWh)
Şehit Abdullah Çavuş Mh.	Onikişubat	435502
Haydar Bey Mh.	Onikişubat	252362,03
Akif İnan Mh.	Onikişubat	227264,57
Mimar Sinan Mh.	Onikişubat	214496,84
Hürriyet Mh.	Onikişubat	184591,9

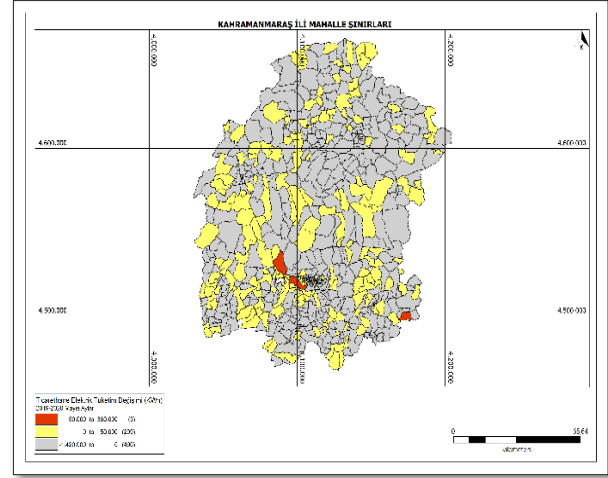
Tablo 4. 2019 ve 2020 Yılları Mayıs Ayı Tüketimi En Fazla Artan Mahalleler

Mahalle Adı	İlçe Adı	Değişim (KWh)
Yeşilyurt Mh.	Elbistan	86995,35
Kılavuzlu Mh.	Onikişubat	86727,369
Gaziosmanpaşa Mh.	Afşin	84108,069
Cumhuriyet Mh.	Onikişubat	78008,586
Şehit Abdullah Çavuş Mh.	Onikişubat	75699,841

3.2. Ticarethane



Şekil 4. 2019 ve 2020 Yılları Nisan Ayı Tüketim Değişimi Haritası



Şekil 5. 2019 ve 2020 Yılları Mayıs Ayı Tüketim Değişimi Haritası

Şekil 5 ve Şekil 6’de yer alan ticarethane abone gurubu elektrik tüketim değişim verisi mahalle bazlı haritalar üzerinden incelendiğinde ticarethane aboneleri için elektrik tüketimindeki azalış gözle görülmektedir. Özellikle merkez mahallelerdeki ticarethanelerin yoğunluğu fazla olan bölgelerdeki elektrik tüketimindeki azalış haritadan tespit edilebilmektedir. Nisan ayında 463 ve Mayıs ayında 490 mahallede elektrik tüketimi azalışı meydana gelmiştir. Mayıs ayında artırılan Covid-19 önlemleri neticesinde ticarethanelerdeki elektrik tüketimi Nisan ayna göre daha da azalış göstermiştir. Tablo 5 ve Tablo 6’da ise geçmiş yıla göre elektrik tüketim azalışı gösteren 5 mahalle ve tüketim değerleri paylaşılmıştır.

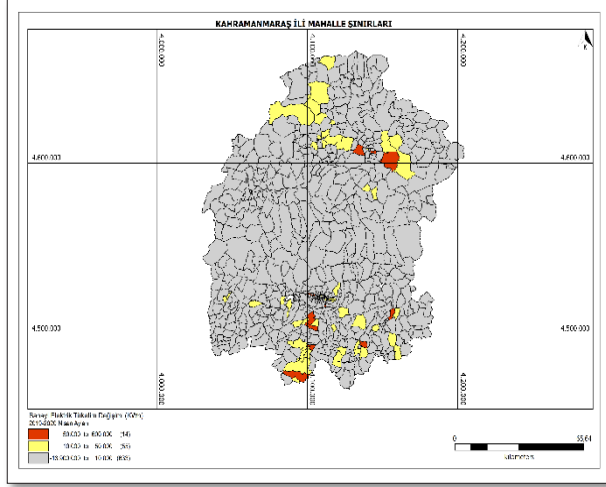
Tablo 5.2019 ve 2020 Yılları Nisan Ayı Tüketimi En Fazla Azalan Mahalleler

Mahalle Adı	İlçe Adı	Değişim (KWh)
Şazi Bey Mh.	Onikişubat	-1289815
Köprübaşı Mh.	Elbistan	-1106197
İsmet Paşa Mh.	Dulkadiroğlu	-1089915
Karacasu Kırım Mh.	Dulkadiroğlu	-732119
Yunus Emre Mh.	Elbistan	-555766

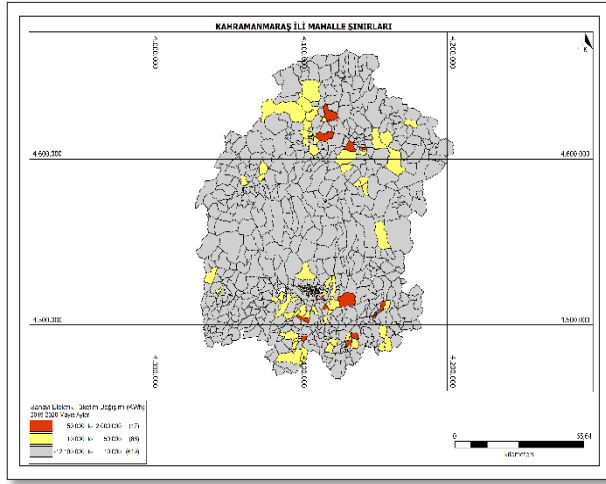
Tablo 6.2019 ve 2020 Yılları Mayıs Ayı Tüketimi En Fazla Azalan Mahalleler

Mahalle Adı	İlçe Adı	Değişim (KWh)
Şazi Bey Mh.	Onikişubat	-1416136
Karacasu Kırım Mh.	Dulkadiroğlu	-1005537
Köprübaşı Mh.	Elbistan	-851744,5
Yavuz Selim Mh.	Dulkadiroğlu	-718490,6
Yunus Emre Mh.	Elbistan	-672293,1

3.3. Sanayi



Şekil 6 2019 ve 2020 Yılları Nisan Ayı Tüketim Değişimi Haritası



Şekil 7.2019 ve 2020 Yılları Mayıs Ayı Tüketim Değişimi Haritası

Şekil 7 ve Şekil 8'de yer alan sanayi abone grubu elektrik tüketim değişim verisi mahalle bazlı haritalar üzerinden incelendiğinde sanayi aboneleri için elektrik tüketimindeki azalış gözle görülmektedir. Özellikle sanayi bölgelerinde yer alan üretim kuruluşları ve fabrikaların yüksek elektrik tükettiği bölgelerdeki azalış haritadan tespit edilebilir. Bu neticede sanayi abone grubunda olan abonelerin Nisan ayında 633 ve Mayıs ayında 619 mahallede elektrik tüketimi azalışı meydana gelmiştir. Mayıs ayında artırılan Covid-19 önlemleri neticesinde sanayideki elektrik tüketimi Nisan ayına göre daha da azalış göstermiştir. Sanayi abone grubunun Covid-19 sürecinden en fazla etkilenen aboneler olduğu rakamlarla ortaya konmaktadır. Tablo 7 ve Tablo 8'de ise geçmiş yıla göre elektrik tüketim azalışı gösteren 5 mahalle ve tüketim değerleri paylaşılmıştır.

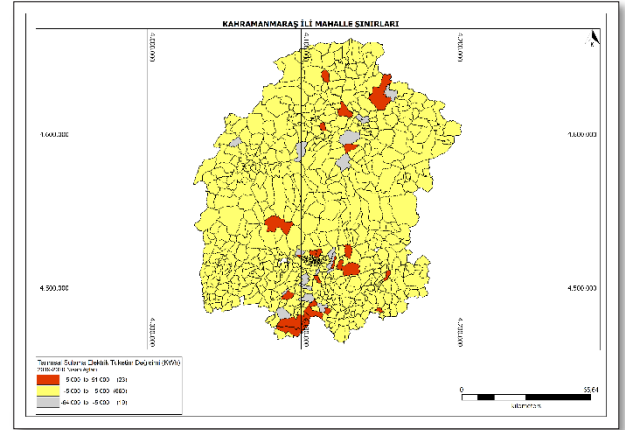
Tablo 7.2019 ve 2020 Yılları Nisan Ayı Tüketimi En Fazla Azalan Mahalleler

Mahalle Adı	İlçe Adı	Değişim (KWh)
Kılılı Mh.	Türkoğlu	-13873919
Karacasu Ferihsu Mh.	Dulkadiroğlu	-12674576
Aksu Mh.	Dulkadiroğlu	-11391292
Eyüp Sultan Mh.	Dulkadiroğlu	-8473053
Karacasu Karaziyaret Mh.	Dulkadiroğlu	-7296587

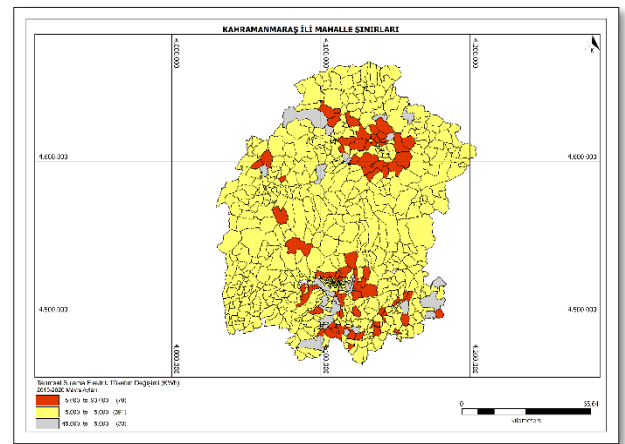
Tablo 8.2019 ve 2020 Yılları Mayıs Ayı Tüketimi En Fazla Azalan Mahalleler

Mahalle Adı	İlçe Adı	Değişim (KWh)
Kılılı Mh.	Türkoğlu	-12045859
Karacasu Ferihsu Mh.	Dulkadiroğlu	-10808946
Aksu Mh.	Dulkadiroğlu	-8175916,9
Eyüp Sultan Mh.	Dulkadiroğlu	-7667004,2
Erkenek Mh.	Dulkadiroğlu	-5648290,4

3.4. Tarımsal Sulama



Şekil 8 2019 ve 2020 Yılları Nisan Ayı Tüketim Değişimi Haritası



Şekil 9. 2019 ve 2020 Yılları Mayıs Ayı Tüketim Değişimi Haritası

Şekil 9 ve Şekil 10'de yer alan tarımsal abone gurubu elektrik tüketim değişim verisi mahalle bazlı haritalar üzerinden incelendiğinde tarımsal sulama aboneleri için elektrik tüketimindeki azalış görülmektedir ancak genellikle bir önceki yıla göre değişim sanayi ve ticarethane aboneleri ile kıyaslandığında çok da değildir. 2019 yılı verisi göz önüne alındığında tarımda çok da farklılık yaşanmadığı söylene bilinir. Tablo 9 ve Tablo 10'de ise geçmiş yıla göre elektrik tüketim azalışı gösteren 5 mahalle ve tüketim değerleri paylaşılmıştır.

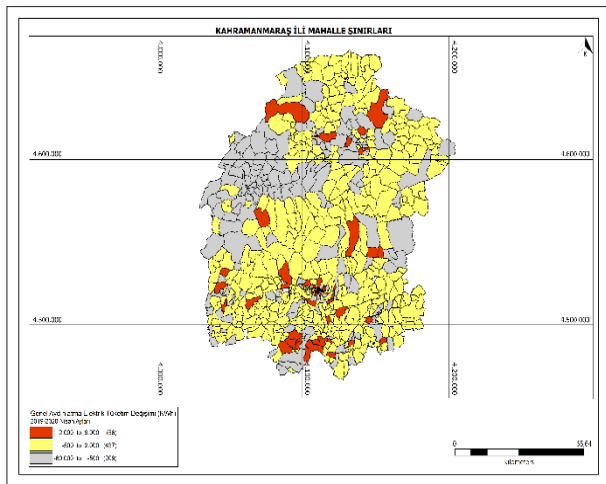
Tablo 9 2019 ve 2020 Yılları Nisan Ayı Tüketimi En Fazla Azalan Mahalleler

Mahalle Adı	İlçe Adı	Değişim (KWh)
Kılavuzlu Mh.	Onikişubat	-63101,93
Çakallıhasanağa Mh.	Türkoğlu	-41826,77
Kandil Mh.	Ekinözü	-37836,72
İncecik Mh.	Elbistan	-27768,19
Özbek Mh.	Türkoğlu	-15650,61

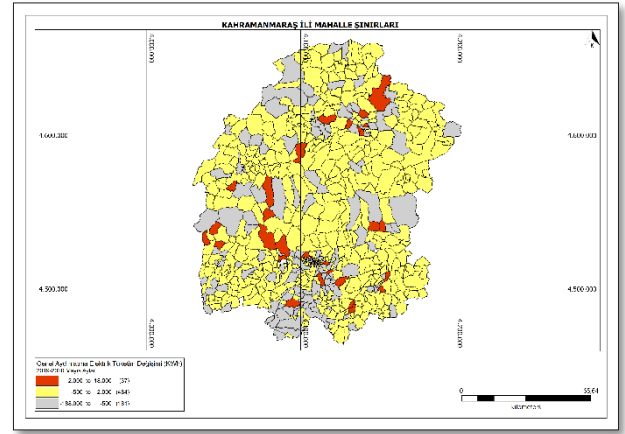
Tablo 10 2019 ve 2020 Yılları Mayıs Ayı Tüketimi En Fazla Azalan Mahalleler

Mahalle Adı	İlçe Adı	Değişim (KWh)
Eyüp Sultan Mh.	Dulkadiroğlu	-44546,96
Evcihüyük Mh.	Elbistan	-41192,81
Çamlıtepe Mh.	Pazarcık	-35220,58
Aşağımülk Mh.	Pazarcık	-31742,82
Beyoğlu Mh.	Türkoğlu	-25544,55

3.5. Genel Aydınlatma



Şekil 10. 2019 ve 2020 Yılları Nisan Ayı Tüketim Değişimi Haritası



Şekil 11. 2019 ve 2020 Yılları Mayıs Ayı Tüketim Değişimi Haritası

Şekil 11 ve Şekil 12'de yer alan genel aydınlatma elektrik tüketim değişim verisi mahalle bazlı haritalar üzerinden incelendiğinde genel aydınlatma için değişimin fazla olmadığı ancak genel bir artış yaşandığı söylene bilinir. Tablo 11 ve Tablo 12'de ise geçmiş yıla göre elektrik tüketim artışı gösteren 5 mahalle ve tüketim değerleri paylaşılmıştır.

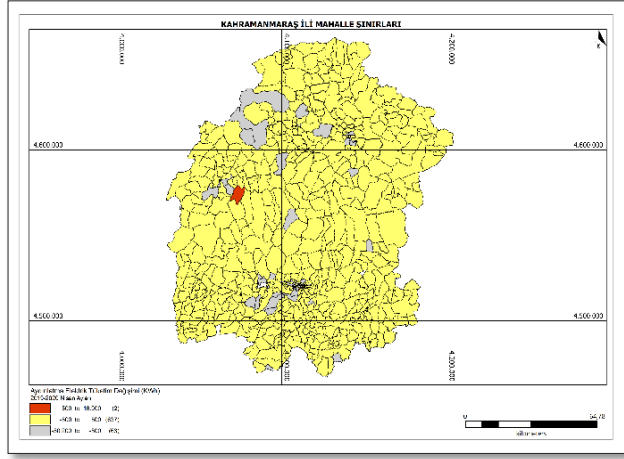
Tablo 11 2019 ve 2020 Yılları Nisan Ayı Tüketimi En Fazla Artan Mahalleler

Mahalle Adı	İlçe Adı	Değişim (KWh)
Karaçay Mh.	Pazarcık	9887,108
Tekir Mh.	Onikişubat	9083,046
Mehmet Akif Mh.	Dulkadiroğlu	8862,32
Şeyh Şamil Mh.	Dulkadiroğlu	8710,969
Kanuni Mh.	Dulkadiroğlu	7887,64

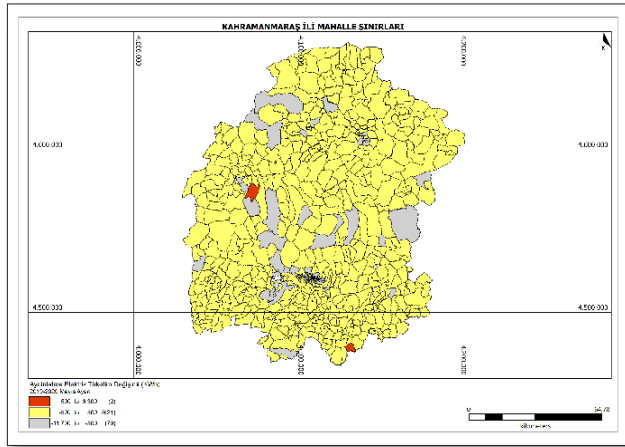
Tablo 12 2019 ve 2020 Yılları Mayıs Ayı Tüketimi En Fazla Artan Mahalleler

Mahalle Adı	İlçe Adı	Değişim (KWh)
Narlı Mh.	Pazarcık	17384,159
Şeyh Şamil Mh.	Dulkadiroğlu	7868,359
Tavşan Tepe Mh.	Onikişubat	7106,524
Gayberli Mh.	Onikişubat	6445,747
Fatih Mh.	Çağlayancerit	6431,769

3.6. Aydınlatma



Şekil 12 2019 ve 2020 Yılları Nisan Ayı Tüketim Değişimi Haritası



Şekil 13 2019 ve 2020 Yılları Mayıs Ayı Tüketim Değişimi Haritası

Şekil 13 ve Şekil 14'de yer alan aydınlatma elektrik tüketim değişim verisi mahalle bazlı haritalar üzerinden incelendiğinde aydınlatma için değişimin fazla olmadığı ancak genel bir artış yaşandığı söylenebilir. Tablo 13 ve Tablo 14'de ise geçmiş yıla göre elektrik tüketim artışı gösteren 5 mahalle ve tüketim değerleri paylaşılmıştır.

Tablo 13 2019 ve 2020 Yılları Nisan Ayı Tüketimi En Fazla Artan Mahalleler

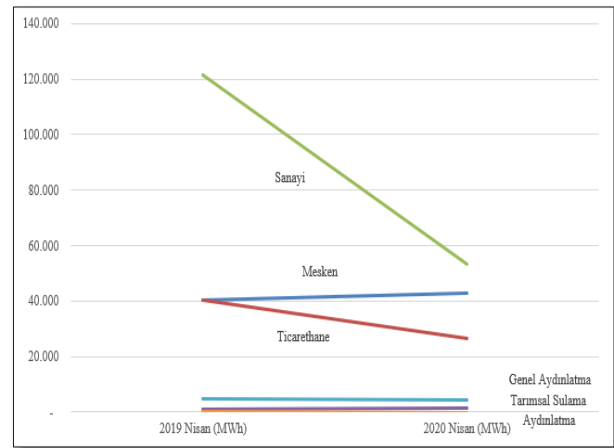
Mahalle Adı	İlçe Adı	Değişim (KWh)
Kurucaova Mh.	Onikişubat	16857,031
Egemenlik Mh.	Dulkadiroğlu	557,704
Çobanlı Mh.	Dulkadiroğlu	407,763
Yürükselim Mh.	Onikişubat	310,186
Mehmet Emin Arıkoğlu Mh.	Pazarcık	175,252

Tablo 14. 2019 ve 2020 Yılları Nisan Ayı Tüketimi En Fazla Artan Mahalleler

Mahalle Adı	İlçe Adı	Değişim (KWh)
Kurucaova Mh.	Onikişubat	6272,41
Çöçelli Mh.	Pazarcık	1448,4
Yeniköy Mh.	Andırın	221,124
Sakarkaya Mh.	Pazarcık	83,725
Yukarıhöcükü Mh.	Pazarcık	69,109

4. Sonuçlar

Covid-19 salgını sürecindeki en göze çarpan husus, alınan önlemler neticesinde çoğunlukla evlerde kalınması suretiyle oluşan mesken elektrik tüketimindeki artmalardır. Bunun yanı sıra yine pandemi önlemleri kapsamında çok sayıda iş yerlerinin kapanması dolayısıyla ticarethane ve sanayi grubu abonelerde ciddi rakamlarda azalmalar görülmüştür. Bu rakam, geçen yıllara kıyasla 2 kata kadar çıkmıştır. Aydınlatma abonelerinde ise bariz farklar olmamakla birlikte genel bir artışın olduğu görülmektedir.



Şekil 14. 2019 ve 2020 Yılları Nisan Ayı Abone Grubu Elektrik Kullanım Verileri

Tüm abone gruplarındaki değişimlerin özeti şeklinde sunulan Şekil 15'ten de görüleceği üzere, Covid-19 salgınının elektrik enerjisi tüketimlerine olan etkilerinin; ülke ekonomisinde, enerji arz-talep dengesinde ve enerji iç piyasasında da yaşanacak değişiminin kaçınılmaz olduğunu söylemek mümkündür.

Teşekkür

Bu çalışmayı destekleyen AKEDAŞ Elektrik Dağıtım A.Ş. ve Başarsoft Bilgi Teknolojileri A.Ş.'ye teşekkür ederiz.

Kaynaklar

- [1] F. Budak And Ş. Korkmaz, "Covid- 19 Pandemi Sürecine Yönelik Genel Bir Değerlendirme : Türkiye Örneği", *Sosyal Araştırmalar Ve Yönetim Dergisi*, No. 1, Pp. 62–79, 2020, Doi: 10.35375/Sayod.738657.
- [2] H. Şirin And S. Özkan, "Covid-19 Epidemiology: In The World And Turkey," *Kulak Burun Boğaz Ve Baş Boyun Cerrahisi Derg.*, Vol. 28, No. 2, Pp. 6–13, 2020, Doi: 10.24179/Kbbbbc.2020-76607.
- [3] N. Donthu And A. Gustafsson, "Effects Of Covid-19 On Business And Research," *Journal Of Business Research*, Vol. 117. Elsevier Inc., Pp. 284–289, Sep. 01, 2020, Doi: 10.1016/J.Jbusres.2020.06.008.
- [4] R. A. Settersten *Et Al.*, "Understanding The Effects Of Covid-19 Through A Life Course Lens," *Adv. Life Course Res.*, P. 100360, Jul. 2020, Doi: 10.1016/J.Alcr.2020.100360.
- [5] E. Karakaya, İ. Değişikliği, And E. Uzmanı, "Covid-19 Krizinin Ekonomi, Enerji Ve Emisyonlara Etkileri: Mevcut Durum Ve Olası Post-Corona Senaryoları." Accessed: Jul. 17, 2020. [Online]. Available: <https://www.iklimhaber.org/covid-19-krizinin-ekonomi-enerji-ve-emisyonlara-etkileri-mevcut-durum->
- [6] "Covid-19'un Ekonomiye Etkisinin Elektrik Tüketimi İle Takibi," 2020. Accessed: Aug. 26, 2020. [Online]. Available: <https://www.tepav.org.tr/tr/haberler/s/10096>.
- [7] "Ytbs." https://ytbs.teias.gov.tr/ytbs/frm_login.jsf (Accessed Oct. 13, 2020).
- [8] "Edabis." https://ytbs.teias.gov.tr/ytbs/frm_login.jsf (Accessed Oct. 20, 2020).

Hasan BEYHAN

Hasan BEYHAN, 1991 Ankara doğumludur. İlk, orta ve lise öğrenimini Ankara'da tamamladı. 2014 yılında Kırıkkale Üniversitesi Endüstri Mühendisliği bölümünden mezun oldu, 2017'de Konya Üniversitesi Harita Mühendisliği Bölümünde Coğrafi Bilgi Sistemi ve Uzaktan Algılama üzerinde yüksek lisans yaptı. 2020'de Hacettepe Üniversitesi İşletme Bölümünde İşletme Yüksek Lisansı (MBA) yaptı. Uzmanlık alanları CBS, Rotalama ve Optimizasyon, Web, Masaüstü ve Mobil Yazılımlar ve Uzaktan Algılama konularıdır. Şu anda Başarsoft Bilgi Teknolojilerinde Yazılım Analisti olarak görev yapmaktadır.

Gizem EREN

Gizem EREN, 1984 Ankara doğumludur. İlk, orta ve lise öğrenimini Ankara'da tamamladı. 2008 yılında Ankara Üniversitesi Ziraat Mühendisliği bölümünden mezun oldu, 2010'de Ankara Üniversitesi Ziraat Mühendisliği Tarım Ekonomisi Bölümünde yüksek lisans yaptı. Uzmanlık alanları CBS, 3D ve Mekansal Analizler, Web, Masaüstü ve Mobil Yazılımlar ve Uzaktan Algılama konularıdır. Şu anda Başarsoft Bilgi Teknolojilerinde Yazılım Analisti olarak görev yapmaktadır.

Fatma AVLİ FIRIŞ

Fatma AVLİ FIRIŞ, 1991 Adana doğumludur. İlk, orta ve lise öğrenimini Adana'da tamamlamıştır. 2013 yılında Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümünde lisans eğitimini, 2018 yılında yüksek lisans eğitimini tamamlayıp 2019 yılında doktora eğitimine başlamıştır. Şu anda AKEDAŞ Elektrik Dağıtım Şirketinde AR-GE Mühendisi olarak görev yapmaktadır.

