

HAZİRAN'20

JUNE'20

Cilt/Volume:10 Sayı/Number:1 Yıl/Year:2020

ISSN 1309-5501



1954

TMMOB
UCTEA

Elektrik Mühendisleri Odası
The Chamber of Electrical Engineers

EMO BİLİMSEL DERGİ

Elektrik, Elektronik, Bilgisayar, Biyomedikal Mühendisliği Bilimsel Dergisi
The Journal of Electrical, Electronics, Computer and Biomedical Engineering

TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası tarafından altı ayda bir yayımlanmaktadır.
Published Biannually by The Chamber of Electrical Engineers

<http://bilimseldergi.emo.org.tr>

Haziran'20

June'20

Sayı/Number: 1 Cilt/Volume: 10
Yıl/Year: 2020

Yayın Sahibi

TMMOB

Elektrik Mühendisleri Odası Adına
Gazi İPEK

Sorumlu Yazı İşleri Müdürü

İbrahim SARAL

Yayın İdare Merkezi

İhlamur 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

Sayfa Düzeni

Hakkı ÜNLÜ
hakki.unlu@emo.org.tr

Yayın Türü

Yerel Süreli Yayın
6 ayda bir yayınlanır

Basım Adedi

500

Basım Tarihi

Haziran 2020

EMO BİLİMSEL DERGİ

Elektrik, Elektronik, Bilgisayar, Biyomedikal
Mühendisliği Bilimsel Dergisi

The Journal of Electrical, Electronics, Computer and
Biomedical Engineering

YAYIN KURULU

BAŞ EDITÖR/EDITOR IN CHIEF

Prof. Dr. A. Hamit Serbest
Çukurova Üniversitesi

EDİTÖRLER/EDITORIAL BOARD

Prof. Dr. Ayhan Altıntaş
Bilkent Üniversitesi

Prof. Dr. Cengizhan Öztürk
Boğaziçi Üniversitesi

Prof. Dr. Erhan Akın
Fırat Üniversitesi

Prof. Dr. Güven Önbilgin
Ondokuz Mayıs Üniversitesi

Prof. Dr. H. Altay Güvenir
Bilkent Üniversitesi

Prof. Dr. Murat Eyüboğlu
Orta Doğu Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Timur Aydemir
Gazi Üniversitesi



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 Nacaroğlu	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

Türkiye’de Yenilenebilir Enerji Uygulamaları, Mevcut Durum ve Gelecek Öngörülleri Renewable Energy Applications in Turkey, Current Status and Future Forecasts <i>Ahmet Yıldız, Önder Özgener, Leyla Özgener</i> Makale Türü: Araştırma Makalesi	7
Kısa Sınavların, Ödevlerin ve Projelerin Dönem Sonu Sınavına Olan Etkilerinin Farklı Makine Öğrenmesi Teknikleri ile Araştırılması Analysis of the Effects of Quizzes, Homeworks and Projects on Final Exam with Different Machine Learning Techniques <i>Karani Kardaş, H. Altay Güvenir</i> Makale Türü: Araştırma Makalesi	21
Türk Kahvesi Pişirme Süreci İçin Algılayıcı Tabanlı Bir Kontrol Yöntemi A Sensor Based Control Method for Turkish Coffee Cooking Process <i>Arda Dönerkayalı, Türker Türker</i> Makale Türü: Araştırma Makalesi	29
Bir Fazlı Şebeke Etkileşimli Eviricide LCL Filtre Parametre Değerlerinin ve Seri Sönümlenme Direnç Değerinin Değişim Etkisi Change Effect of LCL Filter Parameter Values and Series Damping Resistor Value in Single Phase Grid Connected Inverter <i>Akif Karafil</i> Makale Türü: Araştırma Makalesi	37
Serbest Uzay Optik Haberleşme Sistemlerinde Turbo Çarpım Kodların Performans Analizi Performance Analysis of Turbo Product Codes on Free Space Optics Communication Systems <i>Mert Bayraktar</i> Makale Türü: Araştırma Makalesi	45

Türkiye’de Yenilenebilir Enerji Uygulamaları, Mevcut Durum ve Gelecek Öngörülleri

Renewable Energy Applications in Turkey, Current Status and Future Forecasts

Ahmet Yıldız¹ , Önder Özgener² , Leyla Özgener^{2*,3} 

¹ Ege Üniversitesi, Güneş Enerjisi Enstitüsü, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bornova, İzmir, Türkiye
yildiz_ahmet84@yahoo.com

² Ege Üniversitesi, Güneş Enerjisi Enstitüsü, Bornova, İzmir, Türkiye
onder.ozgener@ege.edu.tr , leyla.ozgener@mail.ege.edu.tr

³ Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi,
Muradiye, Manisa, Türkiye
leyla.ozgener@cbu.edu.tr

Öz

Yazımızda küresel ölçekte ve ülkemiz özelinde yenilenebilir enerji uygulamaları ele alınmaktadır. Ekonomik, sosyal, teknik veriler ve kaynak bazında enerji üretim yöntemleri objektif perspektifte ele alınmış ve sayısal veriler ön plana çıkarılmıştır. Her bir bölüm içerisinde yer verilen tanımlama, açıklama, yorum ve öneriler genellikle sayısal verilerin açıklanmasını amaçlamaktadır. Çalışma genelinde, mevcut durum ve yürürlükteki politikalar açıklanmaktadır. Ayrıca yenilenebilir enerjiler alanında kapsamlı bir gösterim sunabilmek için pek çok sosyal ve ekonomik ögeye çalışma içerisinde yer verilerek, mevcut durum ayrıntılı biçimde açıklanmıştır. Çalışma kapsamına dâhil edilen öngörüler ve beklentiler ilgili bölümlerde sunulmaktadır. Son olarak, yakın gelecekte yenilenebilir enerji görünümünün nasıl olacağına değinilerek tutarlı tahminler sunulmaktadır.

Anahtar kelimeler: Yenilenebilir Enerji, Uygulamalar, Politikalar, Enerji Piyasası, Yasal Düzenlemeler

Abstract

In our article, renewable energy applications in global scale and in internal are discussed. Economic, social, technical data and resource-based energy production methods are handled in an objective perspective and quantitative data are shown. The definitions, explanations, comments and suggestions included in each section are usually intended to explain the quantitative data. The current situation and current policies are described throughout the study. Hence,

many social and economic elements are included in order to provide a comprehensive representation in the field of renewable energies. Foresights and expectations, given within the scope of the study are also presented to explain current situation. In addition, the appearance of renewable energy in near future will be discussed to present consisted predictions.

Keywords: Renewable Energy, Practices, Policies, Energy Market, Legal Regulations

1. Giriş

Yenilenebilir enerjiler ve onlara ait uygulamalar pek çok bakımdan ilgi çekici olmakla birlikte, teknik, ekonomik ve sosyal alanlarda da var olan konumunu korumakta ve daha da önemlisi her geçen gün var olan konumunu geliştirmektedir.

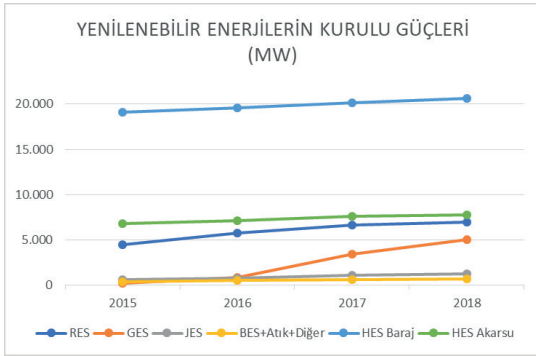
Her geçen gün yenilenebilir enerji alanına olan ilgi ve katılım artmaktadır.

Yenilenebilir kaynaklara dayalı üretim, güneş enerjisine dayalı fotovoltaik temelli ve yoğunlaştırılmış güneş enerjisi (CSP) temelli üretimi, rüzgâr enerjisine dayalı kara ve kıyı ötesi rüzgâr türbinleri temelli üretimi, yer altı sıcak su rezervlerine bağlı jeotermal temelli üretimi, her nevi fosilleşmemiş organik kökenli materyali kullanan biokütle temelli üretimi ve dalga enerjisini açıklamaktadır. Baraj veya akarsu üzerinde kurulu hidroelektrik tesisleri de genel geçer bir kabul ile yenilenebilir kapsamındadır.

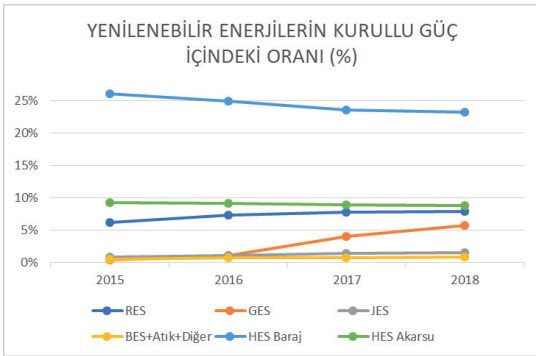
2. Mevcut Durum

Son yıllara ait veriler incelendiğinde, Türkiye’de elektrik üretimi amaçlı yenilenebilir kaynaklarının kullanımı sayısal olarak artış sağlandığı, aynı şekilde bağlı düzeyde de artış olduğu ve kaynak bazında da çeşitliliğin arttığı gözlemlenmektedir.

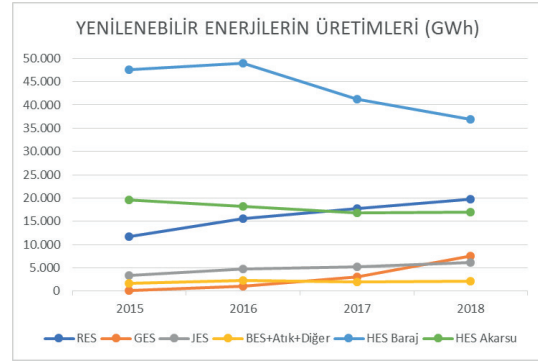
Şekil 1, Şekil 2, Şekil 3 ve Şekil 4 içerisinde, 2015 yılından itibaren 2018 yılı sonuna kadar olan dönem boyunca elektrik üretimi amacıyla kullanılan yenilenebilir enerji türlerinin toplam elektriksel kurulu güçleri ve toplam elektrik üretimi içindeki payları, kaynak türlerine göre sayısal ve bağlı olarak verilmektedir. [1-3]



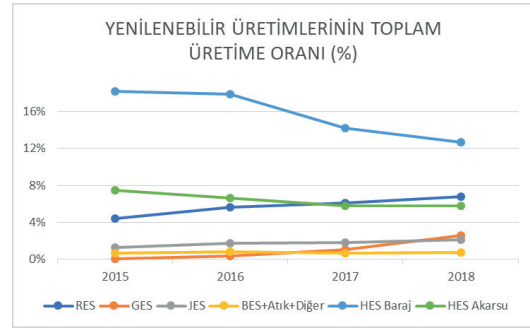
Şekil 1: Türkiye’de 2015 ile 2018 yılları arasında yenilenebilir enerji kurulu güçleri



Şekil 2: Türkiye’de 2015 ile 2018 yılları arasında yenilenebilir enerji kaynaklarının kurulu güç içindeki payları



Şekil 3: Türkiye’de 2015 ile 2018 yılları arasında yenilenebilir enerji kaynaklı elektrik üretimleri



Şekil 4: Türkiye’de 2015 ile 2018 yılları arasında yenilenebilir kaynaklı enerji üretimlerinin payları

Şekiller içerisinde sunulan RES (Rüzgâr Enerjisi Santrali), GES (Güneş Enerjisi Santrali), JES (Jeotermal Enerji Santrali), BES (Biyokütle Enerji Santrali) ve HES (Hidroelektrik Enerji Santrali) kaynak türleri, elektrik enerjisi elde edilmesi amacıyla kullanılan yenilenebilir enerji kaynakları olarak değerlendirilmektedir.

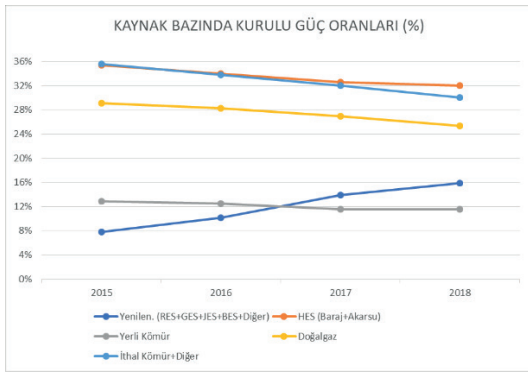
Şekil 1 ve Şekil 2 incelendiğinde son dört yıllık dönemde hidroelektrik gücümüzün nicel olarak arttığı fakat bu artış şebeke genelindeki büyümeden daha düşük seviyede olduğu için nispi olarak kurulu güç içindeki payın azaldığı görülmektedir. Rüzgâr enerjisi kurulu gücü ise nicel olarak ve oransal olarak artmıştır. Biyolojik kaynaklı yenilenebilir kurulu gücü ve jeotermal kurulu gücü aynı şekilde artış göstermiştir. Güneş enerjisi kurulu gücü diğer kaynaklara kıyasla oldukça yüksek bir ivme ile artış göstermiştir.

Şekil 3 ve Şekil 4 üretilen elektrik enerjisini dikkate alarak kaynak bazında yenilenebilir enerji türlerinin gelişimini göstermektedir. Şekil 4 de yenilenebilir kaynaklı üretimler nispi olarak da verilmektedir. Üretim değerleri göz önünde bulundurulduğunda rüzgâr kaynaklı üretimin arttığı görülmekle birlikte, güneş enerjisi kaynaklı elektrik enerjisi üretiminin artışı oldukça yüksek seviyede olmuştur.

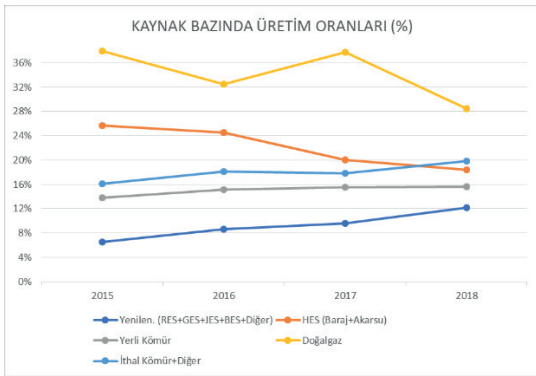
Güncel veriler incelendiğinde, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımında gözle görülür bir ilerlemenin sağlanmış olduğu görülmektedir. Bununla birlikte fosil yakıtları bazlı elektrik üretimi, hala önemli bir pozisyonda bulunmaktadır. Bu görünüm yenilenebilir enerji

yatırımlarının süreceği ve yenilenebilir enerji kurulu gücünün ve yenilenebilir kaynaklı elektrik enerjisi üretiminin toplam elektrik enerjisi üretimine oranının yakın gelecekte de artacağı yönünde beklentilere neden olmaktadır.

Yenilenebilir enerji kaynaklarını, fosil türevi olan enerji kaynakları ile birlikte ele aldığımızda aşağıda Şekil 5 ve Şekil 6 içeriğinde belirtilen durum ile karşı karşıya kalmaktayız. Bu Şekillerin daha kolay analiz edilebilmesi için hidroelektrik kurulumlar diğer yenilenebilir enerji türlerinden ayrılmış ve fosil türevi yakıtlar da yakıt türü ile birlikte yakıtın yerli olup olmamasına göre kategorize edilmiştir.



Şekil 5: Türkiye'de 2015 ile 2018 yılları arasında kaynak türlerine göre kurulu güçlerin dağılımları



Şekil 6: Türkiye'de 2015 ile 2018 yılları arasında kaynak türlerinin elektrik üretimindeki payları

Şekil 5 de kurulu güçler bağıl olarak dikkate alınmıştır, bu şekilde yapılan analiz sadece yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanan santrallerin kurulu güçlerinin toplam elektriksel güce oranının dikkate değer biçimde arttığını göstermektedir. Şekil 6 elektrik enerjisi üretimlerini kaynak bazında nispi olarak ayırarak kaynak türlerini birbirine göre kıyaslama fırsatı sunmaktadır. Her iki Şekil de doğalgaz santrallerinin kurulu gücünün ve elektrik üretiminin azaldığını ve doğalgaz santral yatırımlarının bir şekilde cazibesini yitirdiğini göstermektedir. [4-7]

Özellikle yakın gelecekte devreye alınacak olan Nükleer Güç Santrali kurulumları, planlanan yeni doğalgaz kurulumlarını

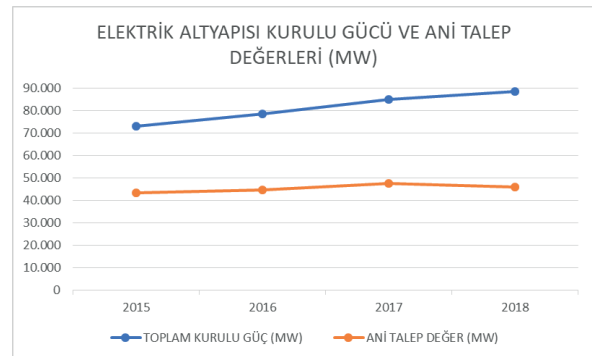
ve elektrik üretimi amaçlı doğalgaz kullanımını büyük ölçüde etkileyecektir.

Kaynak çeşitliliğinin son yıllarda artması ve benzer şekilde kurulu güç değerinin sürekli artıyor oluşu nedeniyle, piyasa katılımcıları tarafından enerji piyasasındaki genişlemenin artık normal bir durum olduğu kabul edilmeye başlanmıştır. Genel teamüller ve mevcut enerji politikalarımızdaki kabuller, elektrik altyapısındaki bu artışın süreceği ve istikrarlı biçimde sürekli büyüyen bir enerji talebi olacağı yönündedir.

Bu kabulü sınamak, doğru olduğu veya yanlış olduğu yönünde fikir beyan edebilmek için ülkemiz ile ilgili bazı hususları incelememiz gereklidir. Ele almamız gereken konular, kurulu güç seviyesi, elektrik üretim seviyesi, anlık güç talebi, elektrik altyapısına ait kapasite kullanımı, nüfus artışı, ekonomik büyüme ve kişi başına gerçekleşen elektrik tüketimidir. Bu hususlar bağıl olarak değerlendirildiğinde, neden enerji tüketimi gelişmiş ülkelerde azalma eğiliminde iken gelişmekte olan ülkelerde artma eğiliminde olduğu daha kolay anlaşılacaktır.

Bu noktada ilk olarak değerlendirilecek olan husus, kurulu gücümüz, elektrik enerjisi tüketimimiz ve anlık güç talebimiz arasındaki bağıl ilişkidir.

Normal koşullarda, işletilmekte olan bir elektrik şebekesinde, elektrik altyapısı anlık güç talebini en yüksek seviyede olduğu durumda dahi karşılamaya muktedir olmalı ve bunun yanı sıra yaklaşık %25 düzeyinde daha fazla kurulu güç kapasitesi içermelidir. Temelde ihtiyacın üzerinde olan bu rezerv, bakıma alındığı veya arızalı olduğu için kapanan santralleri yedeklemek için, yenilenebilir enerji santrallerinin üretim dengesizliklerini minimize etmek için, elektrik şebekesinde güç faktörünü belli bir değerde sabitlemek için ve ani talep artışlarını karşılayabilmek için kullanılmaktadır. Türkiye'deki mevcut durumu açıklayan ve elektrik altyapısı ile yıl içinde görülen en yüksek talep gücünü karşılaştıran veriler Şekil 7 üzerinde gösterilmektedir.



Şekil 7: Türkiye'de 2015 ile 2018 yılları arasında elektrik altyapı ve ani talep güçleri

Şekil 7 ayrıntılı olarak incelendiğinde Türkiye'de temmuz ağustos dönemlerinde elektrik enerjisi tüketiminde görülen ani talep değerinin 50.000 MW seviyesinin altında olduğu halde elektrik kurulu gücümüz 90.000 MW seviyesine yakındır. Kurulu güç seviyesi yıl içinde ihtiyaç duyulan en büyük talep durumunun dahi oldukça üzerindedir. Aradaki

büyük fark altyapımız içerisinde çalıştırılmayan veya çalıştırılması ekonomik olarak uygun olmayan santrallerin olduğu yönünde ipucu vermektedir. Elektrik şebekesi bu şekilde işletildiği zaman baz santraller atıl olarak bekletilmektedir veya bu santrallere ait kapasite faktörleri oldukça düşük olmaktadır. Bu husus Tablo 1 aracılığı ile aşağıda gösterilmektedir.

Tablo 1 Türkiye’de 2015 ile 2018 yılları arasında baz santrallerin kullanım oranları

	2015	2016	2017	2018
Toplam Şebeke Gücü (MW)	73.147	78.497	85.200	88.551
Şebeke Anlık Güç Tüketimi (MW)	43.289	44.734	47.660	46.160
Anlık Talep/ Toplam Kurulu Oranı (%)	59	57	56	52
Yerli Kömür Kapasite Faktörü (%)	44	48	52	51
İthal Kömür Kapasite Faktörü (%)	75	73	65	73
D.GAZ+LNG Kapasite Faktörü (%)	53	46	55	42

Tabloda verilen değerler göz önünde bulundurularak, anlık talebin kurulu güce göre düşük bir seviyede olduğu, bunun doğal bir sonucu olarak baz santrallerin efektif biçimde çalışma fırsatı bulamadığı ve düşük kapasite faktörlerine sahip olduğu söylenebilir. Baz santraller enerji arzının yetersiz olduğu durumda yıllık 8500 saat çalışmaya tekabül eden %97 kapasite faktörü seviyesinde elektrik enerjisi üretimini sağlayabilecek şekilde dizayn edilmektedirler. Mevcut durumda bu santraller ekonomik olacak düzeyde kullanılamamaktadır ve elektrik şebekesine atıl durumda

bekletilmekte olan bu yatırımlar dâhil edilmiş olmaktadır.

2.1 Yenilenebilir Enerji Yasal Düzenlemeleri ve Teşvikleri

Ülkemizde kurulan ilk yenilenebilir enerji santralleri, o yıllarda hâlihazırda yürürlükte olan 04.12.1984 tarih ve 18610 sayılı resmî gazetede yer alan Türkiye Elektrik Kurumu Dışındaki Kuruluşların Elektrik Üretimi İletimi Dağıtımı ve Ticareti ile Görevlendirilmesi Hakkında Kanun çerçevesinde gerçekleştirilmiştir.

İlgili düzenlemede madde 4 ve madde 9 içerisinde enerji satışı konusunda uygulanacak tarife için Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı yetkilendirilmiş ve uygulanacak tarifinin görevli şirketin teklifi ve bakanlığın onayı ile yürürlüğe girmesi kararlaştırılmıştır. Söz konusu düzenlemede yer alan madde 8 uyarınca görev süresi sonunda tesisin devlete bedelsiz olarak devredileceği açıklanmaktadır. Bu şekilde, genel olarak Yap İşlet Devret şeklinde tabir edilen bir model uygulanmıştır.

Sonraki yıllarda elektrik üretiminde özel sektörün payının artması ve özel sektör yatırımlarının bu alana yönelmesi ile birlikte daha kapsayıcı düzenlemelerin yapılması gerekliliği doğmuştur. Bu konuda 04.08.2002 tarih ve 24836 sayılı resmî gazetede Elektrik Piyasası Lisans Yönetmeliği yayınlanmıştır. Bu düzenleme üretim santrali (özel sektör veya EÜAŞ), toptan satış (TETAŞ), dağıtım şirketi (TEDAŞ ve yerel EDAŞ) ve şebeke işletmecisini (TEİAŞ) sorumluluk ve yetkilerini ayıran temel bir düzenlemedir. Lisans türleri, üretim lisansı, otoprodüktör lisansı, otoprodüktör grubu lisansı, iletim lisansı, dağıtım lisansı, toptan satış lisansı, perakende satış lisansı olarak belirlenmiştir.

İlgili düzenlemede bölüm 1 madde 4 içinde yer alan 55. kısımda yenilenebilir enerji kaynakları tanımlanmaktadır. Bu tanımlamada dikkat çeken husus 20 MW altı kurulu güce rezervuarlı hidroelektrik kuruluşlarının tanıma dâhil edilmesidir. Geçici madde 8 ile rüzgâr başvuruları öncesi bir yıllık ölçümün ve ölçümün sonuçlarının Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığına sunulması gerekliliği bildirilmiştir. Elektrik satış fiyatı ile ilgili düzenlemelerin nasıl olacağı konusunda Elektrik Piyasası Tarifeler Yönetmeliği işaret edilmiştir. İlgili düzenleme ile elektrik piyasasında serbesti sağlanmak istendiği açıktır.

Bir sonraki önemli düzenleme 18.05.2005 tarih ve 25819 sayılı resmî gazetede yer alan Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına İlişkin Kanun ile gerçekleşmiştir. Söz konusu düzenleme ile yenilenebilir enerji türleri tek tek tanımlanmıştır ve bununla birlikte genel bir tanımlama ile fosil olmayan kaynaklar olarak tanımlanmıştır. Fakat enerji depolama konusu kapsama alınmamıştır. Yenilenebilir Enerji Kaynak Belgesi verilerek üretim lisansı tüzel kişilerin sahip olduğu yenilenebilir enerji türünün belirleneceği ve izleneceği ilgili yasada belirtilmektedir.

İlgili yasal düzenlemede ilerleyen dönemde 08.01.2011 sayılı 27809 sayılı resmî gazetede yer alan değişiklik ile üretim lisansı sahipleri her yıl başvurularını yenileyerek 31 Ekim tarihine kadar Enerji Piyasası Düzenleme Kurulu ile başvurularını yapacakları ve destek kapsamına alınan başvuruların 30 Kasım tarihine kadar yayınlanacağı hükmüne

yer verilmiştir.

Aynı düzenleme kapsamında Yenilenebilir Enerji Kaynaklarını Destekleme Mekanizması kapsamında düzenleme ekinde yer alan I Sayılı Cetvel uyarınca döviz cinsinden fiyatların Türkiye Cumhuriyet Merkez Bankası döviz alış kuru üzerinden Türk Lirası olarak hesaplanması karara bağlanmıştır. Aynı şekilde yerli ürün kullanımına ilişkin olarak yerli katkı ilavesi II Sayılı Cetvel uyarınca bildirilmiştir.

Yenilenebilir enerji kurumlarının teşvik etmek için ayrıntılı bir tarife tablosu açıklanmış olması, bu tarifeler üzerinden belli süreyi kapsayan alım garantisi verilmesi ve yatırımcının kur riskini üstlenmemesi için teşvik sisteminin döviz cinsinden olması yenilenebilir enerji politikamızda gerçekleşen en önemli adımdır.

Bu mekanizma, yenilenebilir enerji uygulamaları ve yasal düzenlemeleri açısından altın çağ olma niteliğini taşımaktadır.

2018 yılı içinde toplam 19.266 MW kurulu güce sahip olan 708 tesis bu teşvik mekanizması kapsamında desteklenmiş ve aynı yıl içinde tahminen 74.255 GWh seviyesinde elektrik enerjisi teşvik kapsamında yatırımcılardan satın alınmıştır. [8]

2019 yılı içinde toplam 20.801 MW kurulu güce sahip 776 tesis teşvik mekanizması kapsamında desteklenmiştir. Kaynak türlerine göre bu santraller, 12.485 MW kurulu güçte 462 adet hidroelektrik, 6.481 MW kurulu güçte 160 adet rüzgâr, 1.253 MW kurulu güçte 45 adet jeotermal, 499,9 MW kurulu güçte 100 adet biyokütle ve 81,7 MW kurulu güçte 9 adet fotovoltaik şeklindedir. [9]

Yenilenebilir enerjiler konusunda takip eden yasal düzenleme 21.07.2011 tarih ve 28001 sayılı resmî gazetede yer alan Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Belgelendirilmesi ve Desteklenmesine İlişkin Yönetmelik ile gerçekleştirilmiştir.

Söz konusu düzenleme ile uygulama yönündeki zorlukların aşılması amaçlanmış ve yasayı detaylı olarak açıklayan yönetmelik hayata geçirilmiştir. Lisans kapsamındaki üretim tesislerinin ve Lisanssız Üretim kapsamındaki tesislerin destek mekanizmasından on yıl süre ile yararlanabileceği ilgili düzenleme ile belirtilmiştir.

Yenilenebilir enerji yatırımlarının gerçekleştirilmesini teşvik eden bir diğer yasal düzenleme 09.10.2013 tarihli ve 28790 sayılı resmî gazetede yer alan Gönüllü Karbon Piyasası Proje Kayıt Tebliğidir.

Ülkemiz onaylamış olduğu uluslararası protokoller uyarınca karbon piyasasına taraf olmakla birlikte proje bazında karbon piyasasına katılım gönüllülük esasına göre olmaktadır. Avrupa ülkeleri ve diğer birçok gelişmiş ülkede bu yapı yasal düzenlemeler ile zorunluluk haline getirilmiştir.

Söz konusu yasal düzenleme ile ülkemizde karbon salınımını engelleyen yenilenebilir enerji santrallerinin proje bazlı kayıt ve belgelendirme yapılması için yasal altyapı düzenlemeleri gerçekleştirilmiştir.

Ülkemiz genelinde bu yapıya katılım sağlayan yenilenebilir enerji tesisleri olmakta ve karbon salınımının engellenmesi konusunda küresel düzeyde karbon ticareti gerçekleştirilmektedir.

Bu sanal ticareti oluşturan karbon kredileri ülkenin salınımını gerçekleştirdiği sera gazı emisyonu ile ülkedeki toplam elektrik enerjisi üretimi ilişkisi göz önünde bulundurularak hesaplanmaktadır ve 1 MWh yenilenebilir enerji üreten bir tesis 0.52 – 0.55 Ton CO₂ (karbondioksit) gazı salınımını engellemektedir.

2.2 YEKDEM ve YEKA Destek Mekanizmaları

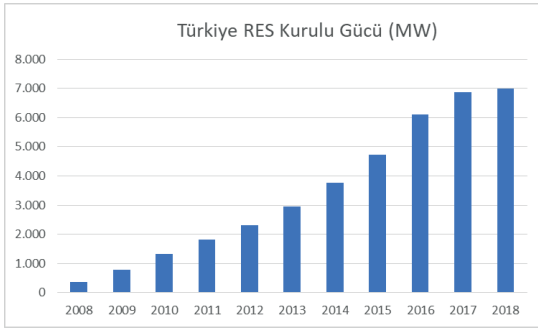
Yenilenebilir Enerji Kaynaklarını Belgelendirme ve Destekleme Mekanizması (YEKDEM) ve Yenilenebilir Enerji Kaynak Alanı (YEKA) süreçleri ülkemizde halen işlemekte olan destek modelleridir. Yenilenebilir enerji için teşvik unsuru olan bu iki model son dönemde ülkemiz yenilenebilir kurulu gücünün artmasında çok kritik bir rol oynamıştır.

Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Belgelenebilirliği ve Desteklenmesine İlişkin Yönetmelik ile 2020 yılı sonuna kadar kurulumu tamamlanıp geçici kabulü yapılacak olan santraller destek mekanizması kapsamına alınmaktadır. 1 Kasım 2017 tarihinde Ankara'da gerçekleşen 6. Türkiye Rüzgâr Enerjisi Kongresi konuşmasında dönemin Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanı tarafından 2021 yılı ve sonrası dönemde Yenilenebilir Enerji Kaynaklarını Destekleme Mekanizması olmayacağı ilk ağızdan açıklanmıştır.

Yasal düzenlemeler ile teşvik ve destek mekanizmaları sağlanmadan yenilenebilir enerji yatırımlarının gerçekleşmesinin çok zor olacağı açıktır. Bu durum her ne kadar uzun vadede yenilenebilir enerji yatırımlarının azalması gibi olumsuz bir sonucu işaret etse de teşvik mekanizmasının bitmesi için belirlenen üç yıllık süre içerisinde yenilenebilir enerji kurumlarının hız kazanması gibi olumlu bir sonuca da yol açmıştır. Ancak üç yıllık bir süre için yenilenebilir enerji kurumlarının artması ve sonrası için yasal belirsizlik olması sektörün sürdürülebilirliği açısından şüphelere yol açmaktadır.

Piyasa katılımcıları tarafından yapılan tahmin, teşviklerin devam edeceği fakat düşen kurulum bedelleri ve düşen enerjinin üretim maliyeti ile birlikte uygulanan desteklerin nicel olarak azaltılacağı şeklindedir. Bu şekilde teşvik ve destek mekanizmalarının tamamen kaldırılacağı, azaltılarak devam edeceği ve aynı şekilde devam edeceği şeklinde farklı gelecek beklentileri oluşmuş durumdadır. Bu durum yenilenebilir enerji piyasasının öngörülebilirliğine mani olmaktadır.

Ülkemizde kurulan ilk yenilenebilir enerji yatırımlarını, kurulu güçlerdeki dağılım dikkate alındığında genelde kara rüzgâr türbinleri oluşturmuştur. Yasanın ilk uygulamaları ve konunun odak noktası genelde bu alan üzerinde olmuştur. Şekil 8 ülkemizdeki rüzgâr enerjisine dayalı elektriksel kurulu gücümüzü göstermektedir. [10]



Şekil 8: Türkiye’de Rüzgâr Enerjisi Kurulu Gücünün Gelişimi

Bakanlık tarafından ilk dönemlerde münferit olarak ele alınan ve sonuçlandırılan rüzgâr başvuruları 1 Kasım 2007 tarihinde bir gün içerisinde toplu olarak alınmıştır. Aynı gün bakanlığa 78 GW kurulu güce denk gelen 751 adet başvuru yapılmıştır.

Bu güç değeri ülkemizin o günkü koşullarda sahip olduğu toplam elektrik kurulu gücü değerinden oldukça fazla olan (yaklaşık iki katı) bir değerdir.

Aynı şekilde ülkemizde 50 metre yükseklikte ortalama 7,5 m/s üzeri rüzgâr hızına sahip olan alanlar için, kilometrekareye 5 MW kurulu gücünde rüzgâr yatırımları yapılması kaydıyla toplamda 48.000 MW kurulu güç elde edilebileceği bilinmektedir. Bu veriler ışığında ülkemiz için Rüzgâr Enerjisi Potansiyel Atlası REPA oluşturulmuştur.

Ayrıca bu kurulu gücün önemli bir kısmı çeşitli nedenlerle değerlendirilememektedir. Bu nedenler yatırımın gerçekleştirileceği alanın havaalanı yaklaşma mesafesine yakın olması, kuş göçlerini tehdit etmesi, radar yaklaşma mesafesine yakın olması, kamulaştırılmayacak olan otoyol, baraj ve su havzası gibi alanları içermesi, askeri güvenlik bölgelerine dâhil olması, uç koşullarda bulunması veya iletim hatlarına çok uzak mesafelerde bulunması gibi koşullardır.

Gerçekleştirilen bu başvurular arasında değerlendirme yapılarak 1.378 MW kurulu güce tekabüle den 63 adet teklî projenin ve 29.152 MW kurulu güce tekabül eden 616 adet kesişen projenin bir sonraki aşamaya geçmesi sağlanmıştır. Bu başvuruların sonuçlandırılması için TEİAŞ tarafından 13 adet paket yarışma açılmış ve bu yarışmalar sonucunda 147 tüzel kişilik için toplamda 5500 MW kurulu güce tekabül eden bağlantı kapasitesi tahsis edilmiştir. Başvurulara ilişkin yarışmalarda başvuru sahibi rüzgâr santralinin bağlanabileceği trafo merkezi baz alınmıştır. [11]

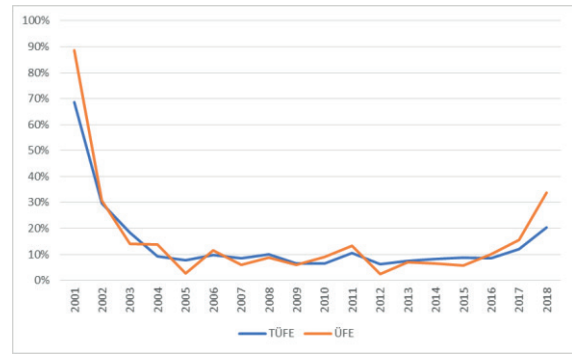
Bu noktada yenilenebilir enerjilerin teşvik edilmesi yaklaşımına tezat bir şekilde yarışma yaklaşımı benimsenmiş ve mantığa uymayan bir şekilde desteklenen bir mekanizma için birbirini takip eden ihaleler yapılmıştır. Bu şekilde TEİAŞ için daha öncesinde öngörülemediği bir gelir kaynağı oluşturulmuştur.

Yarışmalarda tüzel kişilerin 71 adedi 0-1 kuruş-TL/kWh aralığında, 17 adedi 1-2 kuruş-TL/kWh aralığında, 13 adedi 2-3 kuruş-TL/kWh aralığında, 25 adedi 3-4 kuruş-TL/kWh aralığında, 12 adedi 4-5 kuruş-TL/kWh aralığında, 8 adedi 5-6 kuruş-TL/kWh aralığında ve 1 adedi 6-7 kuruş-TL/kWh aralığında teklif vererek bağlantı hakkı elde etmiştir. (TÜREB, 2011)

Verilen teklifler detaylı bir biçimde analiz edildiğinde IRR (yatırımın geri dönüş süresi) hesabı için yatırımcılar tarafından dikkate alınan ve genel geçer bir kabul olan on yıl seviyesinin (psikolojik limitin) aşıldığı görülmektedir. Bu yarışma ile bağlantı hakkı elde eden dezavantajlı projelerin on bir yıl ile on dört yıl arasında değişen geri ödeme sürelerini dikkate aldığı görülmektedir.

Yarışma sonuçlarında ortalama seviyede 1,91 kuruş-TL/kWh olduğu açıklanan katkı payı, 5500 MW kurulu güç ve ortalama %30 kapasite faktöründe ele alınarak hesaplandığında idare için ilk yıl 276 Milyon TL olmak üzere her yıl TÜFE ile artan yirmi yıllık gelir kaynağına tekabül etmektedir.

Bu konuda ülkemizdeki enflasyon ve TÜFE oranlarını dikkate aldığımızda, birim elektrik enerjisi üretimi başına ödenen bedelin yaklaşık yedi yıl içinde iki katına çıkacağı fakat ödeme yükümlülüğünün yirmi yıl devam ettiği görülmektedir. Şekil 9 içerisinde ülkemizdeki enflasyon oranları gösterilmektedir. [12]

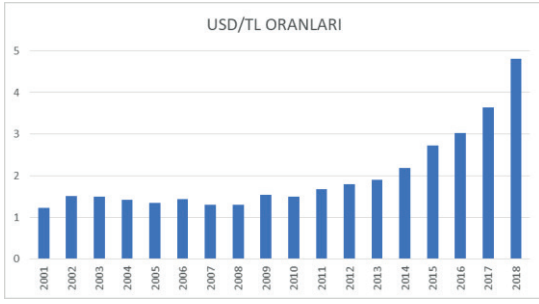


Şekil 9: Türkiye’de enflasyon oranlarını gösteren TÜFE ve ÜFE verileri

Bu konudaki yasal düzenleme 22.09.2010 tarih ve 27707 sayılı resmî gazetede yer alan Rüzgâr Enerjisine Dayalı Üretim Tesisi Kurmak üzere Lisans Başvurularına İlişkin Yarışma Yönetmeliği kapsamında yer almaktadır.

Söz konusu düzenleme ile yatırımcılar yirmi yıl süre ile TÜFE oranında artacak olan ve yılda bir kez tahsil edilecek olan dolaylı bir gideri kabul etmiş olmaktadır.

Sağlanan destekler kapsamında döviz cinsinden elde edilen gelir ve enflasyon oranında değişen sistem giderleri ve vergileri nedeniyle yatırımcı yönünde ve döviz olarak verilen alım garantisi nedeniyle idare yönünde kur risklerinin var olduğunu söylemek mümkündür. Son yıllarda döviz kurlarında görülen yükseliş ve değişkenlik nedeniyle bu risk idare nezdinde zarara sebep olmuştur. Şekil 10 USD kurunun TL karşısında durumunu göstermektedir.



Şekil 10: USD değerinin TL Karşısındaki Değişimi

Takip eden yıllarda yarışmalarda kullanılan usul değiştirilmiş ve 06.12.2013 tarih ve 28843 sayılı resmî gazetede yer alan Rüzgâr ve Güneş Enerjisine Dayalı Üretim Tesisi Kurmak Üzere Yapılan Ön lisans Başvurularına İlişkin Yarışma Yönetmeliği kapsamında düzenlemeler yapılmıştır. Yapılan düzenlemede madde 8 uyarınca yarışma için teklif edilecek olan bedelin üretilen elektrik enerjisi yerine birim kurulu güç (beher MW) başına olması kararlaştırılmıştır. İlgili bedelin yasal düzenleme uyarınca tesis geçici kabulünden sonra 3 yıl içinde yıllık eşit taksitlerle ödenmesi hükmüne bağlanmıştır.

Bu yıllara kadar yarışma sonucunda elde edilen bağlantı hakları (üretim lisansları) tesis kurulumu tamamlanmadan başka tüzel kişilere devredilebilmekteydi. Aynı dönemde 02.11.2013 tarih ve 28809 sayılı resmî gazetede yer alan yasal düzenleme ile Elektrik Piyasası Lisans Yönetmeliği içerisinde değişiklik gerçekleştirilmiştir. Bu şekilde inşa sürecini de içine alan dönem ön lisans sürecine dâhil edilerek, kurulumu tamamlanarak geçici kabulü yapılmamış santrallerin üretim lisansı sahibi olması ve kurulum başlamadan başka bir tüzel kişiye devredilmesi engellenmiştir.

Bu aşamalardan sonra Güneş alanında da yapılacak olan yarışmalar gündeme alınmış, 14.06.2013 tarihi itibarıyla EPDK tarafından 600 MW bağlantı gücünde lisans verilmesi amacıyla başvurular toplanmıştır. Bu başvurulara ilişkin 2015 yılı Nisan ayı içerisinde TEİAŞ tarafından 6 paket yarışma düzenlenmiş ve toplam 7904 MW güce tekabül eden 496 başvuru içerisinden 43 farklı tüzel kişi için toplamda 585,82 MW kurulu güce tekabül eden bağlantı hakkı tahsisi gerçekleştirilmiştir.

Bu yarışmalarda beher MW başına 68.000 TL ile 2.960.000 TL arasında değişen bedeller teklif edilmiş ve ortalama katkı payı fiyatı her bir MW bağlantı hakkı tahsisi için 1.819.079 TL olmuştur. Bu şekilde destekleme mekanizması kapsamında teşvik edilen bir kaynak ile idare yaklaşık olarak 1,06 Milyar TL gelir elde etmiş olmaktadır. Bu şekilde kapasite hakkı tanınan projelerin çok az bir kısmı hayata geçirilmiş olup, üretime geçebilen santrallerin oranı, sağlanan bağlantı hakkı göz önünde tutulduğunda yaklaşık yüzde on kadarlık bir dilime karşılık gelmektedir.

Yarışmalara ait ilk günde (24.04.2015) TCMB USD alış kurunun 2,722 TL olduğu göz önünde bulundurulursa, yatırımcılar her 1 MW bağlantı için ortalama 688.288 USD daha ödemeyi taahhüt ederek yapacakları yatırım maliyetlerinin yaklaşık yarısı kadar dolaylı bir ek maliyeti kabul etmektedirler.

Bununla birlikte güneş enerjisi alanında lisans verilebilmesi için başvuru sürecinde tıpkı rüzgâr başvurularında olduğu gibi bir yıldan üç yıla kadar saha ölçümü yapılmış olması istenmektedir. Güneş enerjisine dayalı elektrik enerjisi üretimi diğer yenilenebilir kaynaklara göre daha yüksek doğrulukla öngörülebildiği göz önünde bulundurulursa bu koşul teşvik yaklaşımı ile uyuşmamaktadır.

Söz konusu yıllarda (2013-2015), doğrudan teklif başvurular ile veya gerçekleştirilen yarışmalar ile idare tarafından tahsis edilen rüzgâr enerjisine dayalı elektrik üretimi amaçlı bağlantı gücü seviyesi (dağıtılan lisans gücü) 10.085 MW seviyesine (yaklaşık yarısı faal olarak çalışan) çıkmıştır.

Devam eden yıllarda, 2014 yılında 3.000 MW rüzgâr enerjisine dayalı elektrik üretimi amaçlı bağlantı için yeni başvuruların alınacağı açıklanmış ve yaklaşık 42 GW seviyesinde olan 1.099 adet başvuru 2015 yılı Nisan ayında alınmıştır. Balıkesir ve Çanakkale illeri özelinde başvuru sayıları her bir il için yüzün üzerinde olmuştur.

Aynı dönemde 2016 yılı Nisan ayı içerisinde 2.000 MW kurulu güce tekabül eden rüzgâr enerjisine dayalı yeni başvuruların alınacağı açıklanmıştır. Bu başvurular önce 2017 yılı Nisan ayına, sonrasında 2018 yılı Nisan ayına, sonrasında 2020 yılı Nisan ayına ve mevcut durumda 2020 yılı Ekim ayına ertelenmiştir.

Rüzgâr yatırımlarının planlama, finansman, saha izinleri ve kurulumlar dâhil olmak üzere yaklaşık iki yıllık bir zaman dilimine ihtiyaç duyduğu göz önünde bulundurulmaktadır. Tüm bu kalan rüzgâr başvurularının kabulü ve yapılan yarışmalar ile sonuçlandırılması gerçekleştirilse dahi, 2009 yılında konulmuş olan 2023 yılında 20.000 MW rüzgâr kurulu gücüne sahip olmamız hedefimize ulaşmamızın mümkün olmadığı açıkça görülmektedir.

2015 yılında EPDK aracılığıyla alınan rüzgâr santrali başvuruları için 2017 yılı içerisinde TEİAŞ tarafından yarışmalar organize edilmiştir. 2017 yılı mayıs ayında 710 MW kurulu güce tekabül eden kısım için ve 2017 yılı aralık ayında 2130 MW kurulu güce tekabül eden kısım için ön lisans yarışmaları sonuçlandırılarak bağlantı hakkı tahsisi sağlanmıştır.

Gerçekleştirilecek olan bu yarışmalar öncesinde yapılan 13.05.2017 tarih ve 30065 sayılı resmî gazetede yer alan Rüzgâr veya Güneş Enerjisine Dayalı Üretim Tesisi Kurmak Üzere Yapılan Ön lisans Başvurularına İlişkin Yarışma Yönetmeliği değişiklikleri uyarınca başvuruların teklif verme usul ve esasları tekrar değiştirilmiştir. Yapılan değişiklik ile yapılacak olan yarışmada YEK I cetvelinde belirtilen, üretilen elektrik enerjisi başına döviz cinsinden belirlenmiş olan, on yıl YEKDEM kapsamında geçerli olacak olan fiyat üzerinden açık eksiltme yapılması kararlaştırılmıştır.

Burada önemli olan bir diğer husus yapılan açık eksiltme usulü ile yapılan yarışma için bir alt limitin olmamasıdır. Teklifi veren başvuru sahibi YEK I cetvelinde verilen döviz cinsinden bedelden daha düşük fiyatı teklif edecek, rekabet koşulları ağırlaştığında teklif bedeli sifira kadar yaklaşacak ve sonrasında eksi teklif verilebilecektir.

Pozitif teklif veren katılımcılar YEKDEM kapsamında destek mekanizmalarından yararlanabilirken eksi teklif verildiğinde başvuru sahibi YEKDEM kapsamında gerçekleştirilen alım garantisinden yararlanamayacaktır. Eksi teklif verildiğinde

başvuru sahibi ürettiği elektrik enerjisini ikili anlaşma ile piyasa koşulları içerisinde satışını gerçekleştirebilecek ve verilen eksi teklif kadar, geliri YEKDEM mekanizmasına devredilecek olan katılım bedeli ödeyecektir.

Yapılan düzenleme ile katılım bedelinin üretilen birim enerji başına USD cinsinden verilen eksi teklif kadar olması, sabit olması, yıllar içinde eskalasyona tabi olmaması ve aylık olarak ödenmesi kararlaştırılmıştır. Bu şekilde şu anda faaliyetine sürdüren yenilenebilir enerji yatırımları için lisans yükümlülükleri bakımından üç farklı uygulama ortaya çıkmış olmaktadır. 2021 yılı ve sonrası dönemde YEKDEM mekanizması da olmayacağı için, yeni destek politikalarını ve yeni yarışma yönetmeliğini içerecek olan yasal düzenlemelerin önümüzdeki süreçte gerçekleştirilmesi beklenmektedir.

2017 yılında gerçekleştirilen yarışmalarda proje geliştiren 1.099 katılımcının 951 adedi teklif vermiş, 85 farklı tüzel kişi toplamda 2820 MW kurulu güce karşılık gelen bağlantı hakkına sahip olmuştur. Yalnızca bir bölgede 20 MW bağlantı hakkı tahsisi kadar olan kısım için yarışma olumsuz sonuçlandırılmıştır.

Yarışmalarda bağlantı hakkı kazanan 85 farklı tekliften 16 adedi pozitif teklif ve 69 adedi negatif tekliftir. Negatif teklifler üretilen her kWh başına usd cent cinsinden olmak üzere, -0,01 ile -2,87 değerleri arasında değişmektedir. Yarışma içerisinde beher MW bağlantı hakkı için (örnek birim değer olarak) -1 usd cent / kWh teklifi veren bir katılımcı on yıl ödeme yükümlülüğü süresi toplamında yatırım bedelinin dörtte biri kadar bir bedeli YEKDEM mekanizmasına ödemeyi ve destek mekanizmasından yararlanmamayı dolaylı olarak kabul etmiş durumundadır.

Yarışma sonucunda bağlantı hakkı verilen santrallerin tamamının kurulduğu ve %30 kapasite faktörü ile işletildiği kabul edildiğinde, eksi teklif veren 69 rüzgâr santrali tarafından YEKDEM mekanizmasına yıllık 93,66 Milyon dolar tutarında katılım payı bedeli ödenecektir. Destek mekanizması kapsamında YEKDEM mekanizmasından yararlanacak olan 16 rüzgâr santrali eğer %30 kapasite faktörü ile işletilirse yıllık 6,02 Milyon dolar tutarında (ürettiği elektrik enerjisi karşılığı) ödeme alacaklardır.

Katkı payı ödeme yükümlülüğü ile kurulan santrallerde yatırımcılar için psikolojik bir sınır olan on yıl geri dönüş süresi kabulü aşılmış ve IRR süresi on yılı aşan projeler gerçekleştirilmiştir. Geçen yıllar içinde rekabet koşulları ilerlemiş ve 2017 yılı aralık ayında verilen tekliflerde, rekabet koşullarının ağır olduğu illerde projelere ait IRR süreleri yirmi ile yirmi iki yıl aralığına çıkmıştır. Bu aşamada yatırımcının öngördüğü geri ödeme süresi, kurulumu yapılan ekipmanın teknik kullanım ömrüne denktir. Söz konusu dönemde YEKDEM ve YEKA mekanizmalarının uygulamaya geçmesi, yenilenebilir enerji kaynakları için açıklanan lisanslı ve lisanssız bağlantı güçlerinin belli bir düzeyden sonra artırılmaması, faiz koşullarının nispeten elverişli olması, yerli ekipman üretimi konusunda teşvik verilmesi gibi nedenler dolayısıyla yenilenebilir enerji piyasası içinde görülen en ciddi rekabet koşulları oluşmuştur.

Aynı yıllarda yerli ekipman üretim kabiliyetimiz geliştirilmesi ve yenilenebilir kaynaklara dayalı elektrik üretimi payının artırılması için güneş ve rüzgâr alanlarında birer adet Yenilenebilir Enerji Kaynak Alanı YEKA

yarışmaları düzenlenmiştir. Söz konusu modelin kullanımı hâlihazırda devam etmekte olup yeni YEKA kurulumları ile ilgili olarak güneş ve rüzgâr alanında başvuru ve proje geliştirme süreçleri devam etmektedir.

Gerçekleştirilen ilk YEKA yarışmasına ait düzenleme 20.10.2016 tarih ve 29863 sayılı resmî gazetede yer almıştır. Güneş enerjisine dayalı elektrik enerjisi üretimi gerçekleştirecek olan Konya Karapınar Yenilenebilir Enerji Kaynak Alanı yarışma için belirlenmiştir. 1.000 MW kurulu güçte olan yatırımın gerçekleştirilmesinin yanı sıra yılda 500 MW üretim kapasitesine sahip olan Fotovoltaik Panel fabrikasının ve ArGe merkezinin kurulması şartnamede yer almıştır. Bu şekilde gerçekleştirilecek yatırımların toplam tutarının 1,3 Milyar dolar seviyesinin üzerinde olacağı bilinmektedir.

Üretilen ürünlerde saf silisyum iğnot yarı mamul maddeden sonraki kısımlarda yerli imkânlar ile üretilmesi, ürünlerin %60 yerlilik oranını sağlaması, belli bir yerli katılımcı ortaklık oranı ve belli bir oranda yerli işgücü kullanımı şart koşulmuştur.

Üretilen elektrik enerjisi için 15 yıl süreli alım garantisi sağlanmış ve garanti edilen alım fiyatının 8 usd cent/kWh seviyesinden açık eksiltme usulü ile gerçekleştirileceği açıklanmıştır. Daha sonra yapılan düzenlemeler ile YEKA santrallerinin YEKDEM mekanizmasında katılımcı sayılacağı, lisans alabilmesi için fabrika kurulumunu tamamlamış olması gerektiği ve işi tamamlamak için ihalede belirtilen gücün %75 seviyesini tamamlaması gerektiği bildirilmiştir. Yapılan düzenlemeler ile fabrika arazisi hibesini de kapsayan teşvikler YEKA düzenlemeleri kapsamında verilmiştir.

Gerçekleştirilen güneş alanındaki ilk YEKA için başvuran dört katılımcı arasında yapılan 20.03.2017 tarihli yarışma ile Hanwha Kalyon ortaklığı verdikleri 6,99 usd cent / kWh teklifleri ile yarışmayı kazanmıştır. Geline aşamada YEKA projesi kapsamında Ankara Başkent OSB içerisinde kurulmakta olan Fotovoltaik panel fabrikası tamamlanmak üzeredir. Fabrikanın faal olmasından sonra üretilen fotovoltaik paneller Konya Karapınar sahasında devreye alınacaktır.

Bu alandaki yatırım sürecinde gelişmeler devam etmektedir, yakın dönemde yabancı ortak olan Hanwha QCELLS firması bu yapıdan çekilmiştir. Kalyon firması başka bir küresel partner olan CETC firması ile süreci devam ettireceğini açıklamıştır. [13]

Rüzgâr alanında yapılan ilk YEKA düzenlemesi 13.04.2017 tarih ve 30037 sayılı resmî gazetede yer almıştır. İlgili düzenleme 1.000 MW kara rüzgâr gücünün kurulumunu kapsamakta ve 15 yıl alım garantisini içermektedir. İhale kapsamında rüzgâr türbini üretimi için fabrika kurulması, belli bir yerli katılımcı ortaklık oranını ve ürünlerin %65 yerlilik oranını sağlaması istenmektedir. Planlanan yatırım seviyesi 1,1 Milyar dolar seviyesinde olacağı tahmin edilmektedir.

Gerçekleştirilen rüzgâr alanında ilk YEKA için başvuran sekiz katılımcı arasında yapılan 27.07.2017 tarihli yarışma Siemens Türkerler Kalyon ortaklığı 3,48 usd cent / kWh teklifleri ile yarışmayı kazanmıştır. Bu durum küresel ölçekte de rekor sayılabilecek bir seviyeye denk gelmektedir.

Söz konusu yarışmaya ait 12 farklı sahayı içeren kurulum aday alanları koordinatlarını gösteren bilgi formları 01.06.2018 tarihinde yayınlanmıştır. Güneş alanında yapılan yarışma için detay projelendirme ve saha izinleri idare tarafından sağlanmışken, rüzgâr alanında yapılan YEKA yarışmasında detay projelendirme ve saha izinleri katılımcı konsorsiyum tarafından gerçekleştirilmektedir. İlerleyen süreçte 29.09.2018 tarih ve 30550 sayılı resmî gazetede 5 farklı saha için kurulum koordinatları açıklanmıştır.

Sonrasında Kırklareli'nde 406 MW, Edirne'de 294 MW, Sivas-Kangal'da 160 MW, Sivas-Gürün'de 90 MW veEskişehir'de 50 MW olmak üzere toplamda 1.000 MW'lık rüzgar yatırımı için 5 ayrı ön lisans başvurusu yapılmış, türbin üretimi için fabrika sahasının İzmir Aliğa'da olacağı açıklanmıştır. Söz konusu tesis 400 MW yıllık üretim kapasitesine sahip olacak ve 2,3 MW gücünde rüzgar türbini üretimini gerçekleştirecektir. Siemens tarafından satın alınmış olan Gamesa firmasına ait olan türbin teknolojisinin bu projede kullanılması planlanmaktadır. [14]

Güneş alanında gerçekleştirilen yarışma sonucunda kurulan Fotovoltaik panel fabrikası tek bir ürün özelinde üretim gerçekleştirerek, tek bir sahada bu ürünü kullanabilmektedir. Rüzgâr alanında yapılan yarışma sonucunda kurulan fabrika muhtemel olarak üreteceği tek rüzgâr türbini ürününü rüzgâr rejimleri birbirinden farklı sahalarda kullanmak durumunda kalacaktır.

Rüzgâr alanında yapılacak olan bir diğer YEKA yarışması kıyı ötesi (Off Shore) kurulumunu kapsamakta olup, yarışmaya ilişkin detay bilgileri 21.06.2018 tarih ve 30455 sayılı resmî gazetede yayınlanmıştır. Bu ihalede oldukça özel olan teknik bir konuda yerli üretim olanaklarının geliştirilmesi karşılığında alım garantisinin verilmesi düşünülmektedir.

Kurulum İğne ada açıkları, Şarköy Enez kıyı aralığı ve Gelibolu kıyısı olmak üzere üç farklı nokta için 400 MW güçlerde olan 1200 MW kıyı ötesi rüzgâr türbini kurulumunu içermektedir. Alım garantisi için 8 usd cent / kWh tavan fiyatı üzerinden açık eksiltme usulü ihale yapılacak ve alım garantisi 50 TWh enerji için verilecektir. Bu kapsamda %40 kapasite faktörü göz önünde bulundurulduğunda 11 ile 12 yıl aralığında olan alım garantisi söz konusu olmaktadır. İlgili yarışma için başvurular 23.10.2018 tarihine kadar devam etmiştir. Yarışmaya katılım için başvuru olmamış ve bu nedenle yarışmanın iptal edildiği açıklanmıştır. İleri tarihlerde aynı projenin tekrar gündeme gelebileceği beklenmektedir.

Kıyı ötesi rüzgâr ölçümlerinin yetersiz oluşu, Enez körfezinin askeri güvenlik bölgesi olması, kıyı derinliklerinin uygun olmaması ve ekonomik parametrelerin yeni yatırımlar için uygun olmaması gibi nedenler projenin önündeki olası engellerdir.

Yapılacak olan 1.000 MW kurulu güçte ikinci YEKA güneş yarışmasının Bor, Viranşehir ve Erzin olmak üzere üç farklı ilçede yapılacağı bilgisi idare tarafından yayınlanmıştır. Söz konusu YEKA yarışması 30 MW elektriksel bağlantı gücünde ve 90 MWh depolama kapasitesine eşit batarya teknolojisinin kurulumunu da içermektedir. Yarışmanın detayları 05.10.2018 tarih ve 30556 sayılı resmî gazete yer almıştır. İlgili yarışma için başvuruların 30.01.2019 tarihine kadar devam edeceği açıklanmıştır. Yarışmaya piyasa

katılımcıları tarafından yoğun ilgi göstermesine karşın, idare tarafından yapılan açıklama ile yarışma iptal edilmiştir. İleri tarihlerde aynı projenin tekrar gündeme gelebileceği beklenmektedir. [15]

07.11.2018 tarih ve 30588 sayılı resmî gazetede 1.000 MW kurulu güçte ikinci YEKA RES yarışması ilanı, her biri 250 MW olacak şekilde Balıkesir, Çanakkale, Aydın, Muğla illerini kapsayacak şekilde yayınlanmıştır. Söz konusu yarışma için yerlilik oranı ve yerli iştirakçi katılımı şartları esnetilmiştir. 07.03.2019 tarihine kadar başvuru sürecinin devam edeceği açıklanmış, sonrasında bu süre 18.04.2019 tarihine ertelenmiştir. İlgili tarihte yapılan açılama yarışma hakkında yapılan itirazların değerlendirilmesi için tekrar erteleme kararı verildiği açıklanmıştır. [16]

Sonrasında, 30.05.2019 tarihinde gerçekleşen yarışma sonucunda; Enerjisa firması Çanakkale bölgesinde 250 MW bağlantı hakkını 3,67 usd cent / kWh teklifi ile, Aydın bölgesinde 250 MW bağlantı hakkını 4,56 usd cent / kWh teklifi ile, Enercon firması Balıkesir bölgesinde 250 MW bağlantı hakkını 3,53 usd cent / kWh teklifi ile, Muğla bölgesinde 250 MW bağlantı hakkını 4,00 usd cent / kWh teklifi ile kazanmıştır. İlgili sahalarda projelendirme çalışmaları devam etmektedir. [17-20]

2.3 Lisanslı ve Lisanssız Yenilenebilir Enerji Santralleri

Yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı küçük kurulumların yaygınlaştırılması ve küçük ölçekli yatırımların da teşvik edilmesinin sağlanması için 2.10.2013 tarih ve 28783 sayılı resmî gazete yayınlanan Elektrik Piyasasında Lisanssız Elektrik Üretimine İlişkin Yönetmelik Kapsamında bazı düzenlemeler yapılmıştır. Belli bir kurulu gücün altında olan yenilenebilir enerji yatırımlarını gerçekleştirmek için lisans alma ve şirket kurma yükümlülükleri kaldırılmıştır.

Bu düzenleme ile küçük ölçekli yatırımcıların başvuru, kurulum ve işletme aşamalarında daha az yükümlülük üstlenmeleri ve yenilenebilir enerji yatırımlarının bu yöntem ile teşvik edilmesi amaçlanmıştır. Düzenlemenin odağını oluşturan temel düşünce, tüketicilerin yapacağı küçük ölçekli yatırımlar ile öncelikle kendi ihtiyacı olan elektrik enerjisini yenilenebilir kaynaklar ile sağlaması ve ihtiyaç fazlası elektrik enerjisinin mevcut elektrik şebekesi aracılığıyla satışidir.

Uygulama alanında karşılaşılan zorluklar yeni düzenlemeler ile giderilmeye çalışılmış ve yasal düzenleme farklı zamanlarda beş kez revize edilmiştir. Başvuru gücü üst limitinin 500 kW seviyesinden 1 MW seviyesine çıkarılması, ilave yerli katkı teşviki alınmaması, başvuru sahibinin kurulum tamamlanmadan tesisi devretmesin önüne geçilmesi, başvuru sırasında projelendirilen öz tüketim oranının artırılması peyderpey yapılan düzenlemeler ile gerçekleştirilmiştir.

Mevcut durumda ülkemizdeki lisanssız kurulu gücünün %94 oranında oldukça büyük bölümünü güneş enerjisine dayalı fotovoltaik santraller oluşturmaktadır. Mevcut lisanssız kurulu güç, kullandıkları kaynak türüne göre 4.703,0 MW güneş, 50,8 MW rüzgâr, 7,4 MW hidrolik, 241,9 MW termik olmak üzere toplam olarak 5.003,1 MW seviyesindedir. Güneş kurulumlarının tamamı şebeke ile senkron olan ve

depolama olanağı olmayan fotovoltaik panel kurulumlarıdır.

Lisanslı fotovoltaik kurulu gücünün 81,7 MW seviyesinde olması, buna karşılık lisanssız fotovoltaik kurulu gücünün 4703,0 MW olması bize bu iki yaklaşımdan birinin pratik uygulamalarında sorun olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte bağlantı hakkına sahip olan tüm fotovoltaik kurulumlar hayata geçirildiğinde dahi lisanslı fotovoltaik gücü 600 MW ve lisanssız fotovoltaik gücü 6.000 MW olacaktır. Olası en müspet durumda dahi fotovoltaik yatırımları kurulu güç ile mukayese edildiğinde teknik olarak işletilebilecek kapasitenin altında olacaktır. Bu veriler ışığında fotovoltaik yatırımlar konusunda ilerlemenin devam edeceği, fakat bunun sağlıklı gerçekleşebilmesi için öngörülebilir, makul ve istikrarlı yasal düzenlemelerin gerekliliği anlaşılmaktadır. [21-26]

3. Gelecek Öngörülleri ve Beklentiler

Açıklanan veriler göz önünde bulundurulduğunda birçok noktada yakın geleceğe ilişkin hususlar öngörülebilir. Teknik özelliklerin ve temel teknolojilerin geliştiği orta ve uzun vadede, öngörülerde bulunmak veya bu doğrultuda bazı politikalara şartlanmak çağımızın gerçekleri ile uyumlu olmayacaktır.

Aşağıda verilen takip eden kısımlarda çalışma kapsamında ele alınan hususlar üzerinde durulmakta ve kısaca bizi bekleyen koşulları açıklamak amaçlı genel beklentileri içeren bir resim sunulmaktadır.

Yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı elektrik enerjisi üretiminin, ülkemizde ve küresel ölçekte artmış olduğu ve bu artışın süreceği açık bir şekilde görülmektedir. Bu ilerleme içinde fotovoltaik kurulumların payı özellikle dikkat çekmektedir ve kısa vadede bu tablonun bozulacağı öngörülmektedir. [27-29]

Ülkemizde yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı elektrik enerjisi üretiminin nicel artışı ve nispi artışı ile birlikte doğalgaz kullanan elektrik santrallerinin üretimlerinde ve üretimdeki payında ciddi bir azalma olmuştur. Doğalgaz santralleri için olumsuz koşulların devam edeceği ve doğalgaz tasfiyesinin kısa vadede de süreceği görülmektedir. [5, 10]

Yeni yapılan enerji yatırımları ile birlikte elektriksel kurulu güç seviyesi artmakta ve anlık talep ile karşılaştırıldığında mevcut kurulu güç seviyesinin ileri bir seviyede olduğu anlaşılmaktadır. Bunun bir sonucu olarak fosil türevi yakıtları kullanan santraller düşük kapasite faktörlerine sahip olmaktadır.

Bu durum göz önünde bulundurulduğunda, kömür gibi fosil yakıtlarına yatırım yapan yatırımcılar öngördükleri oranda sistemlerini çalıştıramamakta ve yatırımın geri dönüşü anlamında beklentilerini karşılayamamaktadır. Kısa vadede fosil yakıtlarını kullanan santraller yatırımcılarına parlak bir vizyon sunamamaktadır.

Bununla birlikte göz önünde bulundurulan zaman dilimi büyütüldüğü artan nüfus, değişen ihtiyaçlar ve gelişen ekonomi ile birlikte kurulu güç seviyesinin artma eğiliminde olacağı açıkça görülmektedir. Orta ve uzun vadede ülkemizde elektriksel kurulu güç ve enerji tüketimi artacaktır, yapılan tartışmalar bu artışın ne oranda olacağı ile ilgilidir.

Ülkemizdeki kurulu güç seviyesi her altı yılda iki katına çıkmaktadır.

Yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı elektrik enerjisi üretimi küresel ölçekte kendini ispatlamış bir alandır. Günümüzde özellikle solar fotovoltaik sistemler alanında yatırımlar artarak sürmektedir. Yenilenebilir enerji kaynakları dünya çapında yıllık 300 milyar dolar seviyesinde aktif bir pazarı temsil etmektedir. Bu pazarın yakın gelecekte de büyüyeceği açıktır.

Çalışma kapsamında nüfus ve ekonomi gibi sosyal veriler de incelenmiştir. Bu verilerin de olumlu etkisi ile elektrik enerjisi ve kurulu güç taleplerini tetikleyeceği öngörülmektedir. Orta ve uzun vadede bu ilerlemenin devam edip edemeyeceği tartışmalı bir alandır.

Ülkemiz özelinde ekonomik veriler kısa vadede değişken olmakla birlikte, uzun kapsamda değerlendirildiğinde ekonomik gelişimin mevcut olduğunu söylemek mümkündür. Bununla birlikte gelişmekte olan bir ekonomiye sahip olan ülkemiz kişi başına düşen enerji tüketimi bakımından hala dünya ortalamasının altındadır.

Yenilenebilir enerji yatırımları karar sürecinde yatırım maliyeti, işletme maliyeti ve kaynaktan elde edilebilecek enerji unsurları bir arada değerlendirilmektedir. Bu noktada kara rüzgâr türbinleri ve fotovoltaik sistemler her üç yönden de avantajlı konumdadır ve yakın gelecekte de bu avantaja sahip olacağı öngörülmektedir.

Yenilenebilir enerji yasal düzenlemelerinin odak noktasında Yenilenebilir Kaynak Kullanım Alanı yarışmaları yer almaktadır. YEKA yarışmalarının daha küçük ölçekte yapılarak sürdürüleceği anlaşılmaktadır. Bununla birlikte 2021 yılı ve sonrası dönemde yapılacak olan yenilenebilir enerji kurulumlarını kapsayacak olan yeni yasal düzenlemelerin gerçekleştirileceği açıktır. Bu değişiklikler gerçekleşene kadar yapılan yenilenebilir enerji kurulumlarında kısa dönemli bir duraklama gözlenebilecektir.

2021 yılı ve sonrası dönemler için yapılacak olan yeni yasal düzenlemeler öngörülebilirliği sağlamalı, şeffaf ve denetlenebilir bir piyasaya izin vermelidir. Sürdürülebilirliğin sağlanması için yenilenebilir enerji kaynakları için yıllık düzeyde sürekliliği sağlayacak olan yeni kapasitelerin açıklanmasının gerekliliği açıktır. YEKDEM dönemi sonrası muhtemelen Türk Lirası cinsine çekilmiş olan EPDK tarifeleri kapsamına alınacak olan sürekliliği olacak olan bir teşvik sisteminin kurgulanması muhtemeldir. Piyasa katılımcıları için yatırımlarına ait IRR süreleri kadar bir dönemi öngörebilmeleri piyasanın sağlıklı işleyebilmesi için önemlidir.

Teşvik ve destek mekanizmaları ile yerli üretim olanaklarımıza katkı sağlanmış ve bireysel girişimciler ile belli bir yerli üretim kapasitesine sahip olunmuştur. Bu üretim mekanizmalarının ayakta kalabilmesi ve yerli üretim olanaklarımızın sürdürülebilirliğinin sağlanması için tutarlı, öngörülebilir ve istikrarlı bir piyasaya ihtiyaç duyulmaktadır. Hızlı yükselişe geçen yenilenebilir enerji yatırımları, belli bir süre sonunda daralma ile sonuçlanarak piyasa istikrarını ve sürdürülebilirliğini olumsuz yönde etkileyecektir.

Bu kapsamda sahip olduğumuz fotovoltaik panel üretebilme olanağımızın fotovoltaik panel kurulu gücüne denk seviyede olması ayrıca düşündürücü bir durumdur. Kısa ve orta vadede

yenilenebilir enerji alanında tedarikçi, üretici, yatırımcı ve müteahhit olarak çalışan firmaların sayısının azalabileceği yönünde beklentiler oluşmuştur.

Yakın gelecekte muhtemel olarak, lisanslı ve lisanssız üretim alanında yeni yasal düzenlemeler yayınlanacak, yeni tarifeler lanse edilecek, piyasanın serbestisi yönünde adımlar atılacak ve özel sektörün katılımı artacaktır.

4. Sonuç

Son olarak, küresel ölçekte gelişen yenilenebilir enerji piyasası ve ilerleyen teknolojilerin etkisi ile enerji üretim maliyetleri önemli ölçüde düşmektedir. Bu ilerleme devam edecek ve elektrik fiyatları kısa ve orta vadede düşüş eğiliminde olacaktır. Elektrik fiyatı beklentisi, enerji depolama teknolojileri, elektrikli araçlar, mikro şebekeler gibi pek çok önemli gelişmeyi etkileyebilecek düzeyde ve kilit noktada olan bir husustur.

Kaynaklar

- [1] Elektrik Mühendisleri Odası URL: http://www.emo.org.tr/genel/bizden_detay.php?kod=88369 (Erişim Zamanı; Mart 9, 2019)
- [2] Türkiye Elektrik İletim AŞ URL: <https://www.teias.gov.tr/tr/elektrik-istatistikleri> (Erişim Zamanı; Mart 10, 2019)
- [3] Türkiye Elektrik İletim AŞ URL: <https://www.teias.gov.tr/tr/turkiye-elektrik-uretim-iletim-istatistikleri> (Erişim Zamanı; Mart 10, 2019)
- [4] Yeşil Ekonomi URL: <https://yesilekonomi.com/kurulu-guc-88-gwi-asti/> (Erişim Zamanı; Kasım 19, 2018)
- [5] Yeşil Ekonomi URL: <https://yesilekonomi.com/aksa-enerji-manisadaki-dogal-gaz-santralini-kapatiyor/> (Erişim Zamanı; Kasım 19, 2018)
- [6] İmer S., Dalbudak A., Türkiye’de Nükleer Santral Kurulması Ve Dış Politikaya Olası Etkileri, Gazi Akademik Bakış 5 / 10, 147-172, 2012
- [7] Özbaş E., Türkiye’nin Kalkınması İçin İtici Güç Olan Enerjiye Toplu Bakış, Türk Dünyası Araştırmaları 104 / 206, 193-208, 2014
- [8] Enerji Günlüğü URL: <https://enerjigunlugu.net/icerik/25111/2018-yili-yek-listesi-yayinlandi.html> (Erişim Zamanı; Ekim 1, 2018)
- [9] Yeşil Ekonomi URL: <https://yesilekonomi.com/epdk-2019-yekdem-listesini-yayinladi/> (Erişim Zamanı; Kasım 19, 2018)
- [10] TÜREB Türkiye Rüzgâr Enerjisi İstatistik Özet Raporu, Temmuz 2018
- [11] TÜREB TEİAŞ Rüzgâr Yarışmaları Raporu, Ekim 2011
- [12] KPMG URL: <https://kpmgvergi.com/PratikBilgiler/Pages/Ufe-Tufe-Oranlari.aspx> (Erişim Zamanı; Ekim 3, 2018)
- [13] Enerji Günlüğü URL: <https://www.enerjigunlugu.net/kalyon-gunes-paneli-fabrikasini-icin-cinli-cetc-ile-isbirligi-yapacak-34609h.htm> (Erişim Zamanı; Kasım 26, 2019)
- [14] Yeşil Ekonomi URL: <https://yesilekonomi.com/yeka-res-1-icin-on-lisans-basvurulari-yapildi/> (Erişim Zamanı; Kasım 19, 2018)
- [15] TÜREB URL: <https://enerjigunlugu.net/icerik/28918/yeka-ges-2-ihale-basvurulari-ocakta-alinacak.html> (Erişim Zamanı; Ekim 3, 2018)
- [16] TÜREB URL: http://www.tureb.com.tr/files/ofis_duyuru/2018/yeka_res_2_gorus_ve_talepler.pdf (Erişim Zamanı; Ekim 3, 2018)
- [17] Enerji Günlüğü URL: <https://www.enerjigunlugu.net/enerjisa-yeka-res-2-canakkale-bolgesini-de-kazandi-32657h.htm> (Erişim Zamanı; Kasım 26, 2019)
- [18] Enerji Günlüğü URL: <https://www.enerjigunlugu.net/aydina-250-mwlik-ruzgar-santralini-enerjisa-kuracak-32653h.htm> (Erişim Zamanı; 26, 2019)
- [19] Enerji Günlüğü URL: <https://www.enerjigunlugu.net/enercon-yeka-res-2-balikesir-bolgesini-de-kazandi-32655h.htm> (Erişim Zamanı; 26, 2019)
- [20] Enerji Günlüğü URL: <https://www.enerjigunlugu.net/mugla-bolgesi-ruzgar-yarisinin-kazanani-enercon-oldu-32652h.htm> (Erişim Zamanı; Kasım 26, 2019)
- [21] Colak I., Bayindir R., Fulli G., Tekin I., Demirtas K., Covrig C.F., Smart grid opportunities and applications in Turkey, Renewable and Sustainable Energy Reviews 33, 344-352, 2014
- [22] Benli H., Potential of renewable energy in electrical energy production and sustainable energy development of Turkey: Performance and policies, Renewable Energy 50, 33-46, 2013
- [23] Toklu E., Overview of potential and utilization of renewable energy sources in Turkey, Renewable Energy 50, 33-46, 2013
- [24] Varlık İ.G., Yılmaz A., Türkiye ekonomisinde yenilenebilir enerji projelerinin gerçekleştirilmesinde sorunlar ve çözüm önerileri, Finans Politik ve Ekonomik Yorumlar Dergisi, 54 / 623 51-62, 2017
- [25] Çınar S., Yılmaz M., Yenilenebilir enerji kaynaklarının belirleyicileri ve ekonomik büyüme ilişkisi: Gelişmekte olan ülkeler örneği, Dokuz Eylül Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi 30 / 1, 55-78, 2015
- [26] Peker Z., Yenilenebilir enerji gelişmelerinin sosyal boyutu, Dokuz Eylül Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, 15 / 4, 663-691, 2015

- [27] Melikoglu M., Vision 2023: Feasibility analysis of Turkey’s renewable projection, *Renewable Energy* 50, 570-575, 2013
- [28] Melikoglu M., Vision 2023: Scrutinizing achievability of Turkey’s electricity capacity targets and generating scenario based nationwide electricity demand forecast, *Energy Strategy Reviews* 22, 188-195, 2018
- [29] Ozcan M., Factors influencing the electricity generation preferences of Turkish citizens: Citizens’ attitudes and policy recommendations in the context of climate change and environmental impact, *Renewable Energy* 132, 381-393, 2019

Ahmet YILDIZ



Ahmet Yıldız, 23 Mayıs 1984 tarihinde Balıkesir’de doğmuştur. İlk ve orta derece öğrenimini, 1991-1998 yılları arasında İzmir’de tamamlamıştır. Lise öğrenimini, 1998-2002 yılları arasında İzmir Mithatpaşa Anadolu Teknik Lisesi Elektronik bölümünde tamamlamıştır. Ön Lisans öğrenimini 2002-2004 yılları arasında Dokuz Eylül Üniversitesi İzmir Meslek Yüksek Okulu Endüstriyel Elektronik bölümünde tamamlamıştır. Lisans öğrenimini 2004-2008 yılları arasında İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Enerji opsiyonunda tamamlamıştır. Yüksek Lisans öğrenimini 2009-2011 yılları arasında Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsü Enerji Teknolojisi programında tamamlamıştır. Doktora öğrenimine 2011 yılından itibaren Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsü Enerji Teknolojisi programında devam etmektedir. TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası üyesidir. Lisans öğrenimi mezuniyetinden itibaren özel sektör içerisinde Elektrik Mühendisi pozisyonunda çalışmaktadır. Halen yapı, enerji ve yenilenebilir enerji alanlarında taahhüt, danışmanlık, iş geliştirme ve santral işletme görevlerinde yer almaktadır. Evli ve bir çocuk babasıdır. Akademik düzeyde yer aldığı çalışmalar; SCI indeksli dergiler olan Energy & Buildings ve Renewable Energy dergilerinde iki adet yurtdışı makale çalışması, uluslararası hakemli bir dergi olan Mühendis ve Makine dergisinde bir adet yurtiçi makale çalışması, bir adet uluslararası seminer (bildiri) çalışması, bir adet Ege Üniversitesi destekli Bilimsel Araştırma Projesi.

Prof. Dr. Önder ÖZGENER



Prof. Dr. Önder Özgener, Cornell Üniversitesi, Cornell Enerji Enstitüsü, Ithaca, New York (2012-2013), University of South Florida, Temiz Enerji Araştırma Merkezi’nde, Tampa, Florida’da (2016) ziyaretçi profesör olarak çalışmıştır. 2015-2018 yıllarında İzmir Ekonomi Üniversitesi’nde Enerji Dağıtım, Yenilenebilir Enerjiler Lojistiği derslerini vermiştir. 2017 yılından bu yana Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsü’nde profesör olarak görev yapmaktadır. Termodinamik, yenilenebilir enerjiler üzerine 40’ dan fazla SCI makalesi, uluslararası saygın yayınevlerince basılmış 3 kitap bölümü, bu çalışmalarına Google Scholar’a göre 3000’in üzerinde atfı vardır, H-indeksi 30 dur. Uluslararası bazı uluslararası dergilerin yayın kurullarında görev yapmış ve yapmaktadır. Danışmanlığında ya da eş danışmanlığında tamamlanmış 7 adet yüksek lisans ve doktora çalışması yürütmüştür. TÜBİTAK, DPT, üniversite destekli çok sayıda araştırma projesinde yürütücü, araştırmacı olarak yer almıştır. Yine çok sayıda sanayi ve kamu kuruluşunda neticelendirilmiş araştırma çalışmaları mevcuttur. TÜBİTAK 2014 Bilim Teşvik ödülü başta olmak üzere çok sayıda ödülün sahibidir. World Bank, NATO ve TÜBİTAK’tan akademik çalışmaları sebebi ile burs almaya layık bulunmuştur (daha fazla bilgi için <http://www.ozgeners.com>).

Doç. Dr. Leyla ÖZGENER



Doç. Dr. Leyla Özgener, Cornell Üniversitesi, Cornell Enerji Enstitüsü, Ithaca, New York (2012-2013), University of South Florida, Temiz Enerji Araştırma Merkezi’nde, Tampa, Florida’da (2016) ziyaretçi profesör olarak çalışmıştır. 2015-2018 yıllarında Yaşar Üniversitesi’nde Jeotermal Enerji derslerini vermiştir. 2011 yılından bu yana Manisa Celal Bayar Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünde doçent olarak çalışmaktadır. 2019 yılından bu yana Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsü’nde görevlendirilmiştir. Termodinamik, yenilenebilir enerjiler, jeotermal enerji, ısı transferi üzerine çoğu Q1 kategorisinde 50 den fazla SCI makalesi, uluslararası saygın yayınevlerince basılmış 4 kitap bölümü, bu çalışmalarına Google Scholar’a göre 2500’ün üzerinde atfı vardır, H-indeksi 31 dir. ELSEVIER yayınevinin WOS Q1 sıralamasında, GreenTechnology kategorisinde1. Sırada yer alan Renewable&SustainableEnergyReview dergisinin 2011 yılından bu yana editörleri arasındadır. Yine uluslararası bazı uluslararası dergilerin yayın kurullarında görev yapmış ve yapmaktadır. Danışmanlığında ya da eş danışmanlığında tamamlanmış 12 adet yüksek lisans ve doktora çalışması yürütmüştür. TÜBİTAK, DPT, üniversite destekli çok sayıda araştırma projesinde yürütücü, araştırmacı olarak yer almıştır. Yine çok sayıda sanayi ve kamu kuruluşunda neticelendirilmiş araştırma çalışmaları mevcuttur. FABED 2015 ödülü başta olmak üzere çok sayıda bilim ve akademik performans ödülüne sahibidir. World Bank, NATO ve TUBITAK’tan akademik çalışmaları sebebi ile burs almaya layık bulunmuştur (daha fazla bilgi için <http://www.ozgeners.com>).

Kısa Sınavların, Ödevlerin ve Projelerin Dönem Sonu Sınavına Olan Etkilerinin Farklı Makine Öğrenmesi Teknikleri ile Araştırılması

Analysis of the Effects of Quizzes, Homeworks and Projects on Final Exam with Different Machine Learning Techniques

Karani Kardeş¹ , Altay Güvenir² 

¹Havelsan A.Ş, Komuta Kontrol ve Savunma Teknolojileri Direktörlüğü, Ankara, Türkiye

kkardas@havelsan.com.tr

²Bilkent Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye
guvenir@cs.bilkent.edu.tr

Öz

Bu çalışma Bilkent Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü'nde verilen Programlama Dilleri dersi kapsamında yapılan kısa sınavların, ödevlerin ve projelerin dönem sonu sınavına olan etkisini sunar. Bu bağlamda çalışmanın ilk kısmında, öğrenci verilerinden kısa sınav bilgileri ile Lineer Regresyon yöntemi kullanılarak lineer bir model üretilmeye çalışılmış ve dönem sonu sınav notu tahmin edilmeye çalışılmıştır. Çalışmanın ikinci kısmında ise En Yakın Komşu (KNN), Lineer Regresyon, Lojistik Regresyon, Destek Vektör Makineleri (SVM), Lineer Destek Vektör Makineleri ve Çok Katmanlı Algılayıcılar (MLP) makine öğrenmesi yöntemleri kullanılarak kısa sınavların, ödevlerin ve projelerin ayrı ayrı ve birlikte dönem sonu sınav notuna etkisi gösterilmeye çalışılmıştır. Çalışma, kullanılan makine öğrenmesi yöntemlerinin karşılaştırmalı performansını göstermektedir. Deneysel sonuçlar lineer modelimizin iyileştirilmesi gerektiğini belirtirken, sınıflandırma işlemlerinin başarılı bir şekilde elde edildiğini göstermektedir.

Anahtar kelimeler: Öğrenci performans tahmini, öğrenci performansı, kısa sınav, dönem sonu sınavı, makine öğrenmesi, lineer regresyon

Abstract

This study presents the effect of quizzes, assignments and projects on the final exam of the Programming Languages course given in the Department of Computer Engineering at Bilkent University. In this context, in the first part of the study, a linear model is tried to be produced by using the linear regression method from the student data and the final exam grade is estimated. In the second part of the study, K-Nearest Neighbors(KNN), Linear Regression, Logistic Regression, Support Vector Machines(SVM), Linear Support Vector Machines and Multi-layer Perceptron (MLP) machine learning methods are used to show the effect of quizzes, assignments and projects separately and together on the final exam grade. The study shows the comparative performance of machine learning

methods used in the experiment. Experimental results show that our linear model needs to be improved, while classification operations are achieved successfully.

Keywords: Student performance prediction, student performance, quiz, final exam, machine learning, linear regression

1. Giriş

Eğitim hiç şüphesiz birçok insanı ve ülkelerin geleceklelerini etkileyen çok önemli bir kavramdır. Eğitim kurumlarının ana hedeflerinden biri eğitim kalitesini ve performansını arttırmak için bireysel performansları izlemektir. Bireysel zayıf yönlerin tespiti ve öğrencilerin gelecek için doğru yöne yönlendirilebilmesi daha iyi bir gelecek için önemlidir [1]. Eğitim kurumlarından biri olan üniversitelerde de öğrencilerin derste gösterdiği performans dikkat edilmesi gereken bir husustur ve fakülte, enstitü gibi alt kurumlara kaliteyi ve performansını artırma adına önemli bilgiler sağlar.

Öğrencilerin akademik performans ölçümü zor bir süreçtir. Bu durumun ana nedeni ise öğrencilerin ders performansını etkileyen birçok faktörün olmasıdır [1 ve 2]. Ders kalitesini arttırmaya yönelik ders kapsamında yapılan kısa sınavlar (İng. quiz), ödevler, ara sınavlar ve projeler bu faktörler arasında düşünülebilir. Bu çalışmalar dönem boyunca öğrenme sürecini olumlu yönde etkiler, öğrencilere geri bildirimde bulunulmasına yardımcı olur ve dönem sonu sınavı öncesi öğrencilerin iyi ve yararlı yönde uyarılmasını sağlar. Ayrıca bu şekilde bir geri bildirim yararlarından biri de derste başarısız olma veya dersi bırakma olasılığı yüksek olarak değerlendirilen öğrencilere yararlı bir uyarı sağlamasıdır [3]. Dönem sonu geçme notunu da etkileyen bu çalışmalara öğrenciler tarafından yeterli düzeyde önem verilmesi gerekmektedir. Bahsedilen çalışmalar sadece öğrencilere değil, dersi veren öğretmenlere de büyük faydalar sağlar. Öğretmenler de dersin dönem boyunca öğrenciler tarafından anlaşılma zorluk çekilen konular hakkında bilgi sahibi olup, öğrencilerin gelişim takibini yapabilir ve dersin kalitesinin artırılmasına yönelik olarak bu bilgileri kullanabilirler. Bu şekilde öğrenci performansının takibi özel ilgi gerektiren öğrenciler için de faydalar sağlar [4].

Çevrimiçi eğitim veren sistemlerin artması ile birlikte bu sistemler üzerinden milyonlarca insan, gerek öğrenci veya gerek

de iş yaşamında aktif rol alan çalışanlar olarak çeşitli eğitimler almaktadırlar [5]. Bu sistemler üzerinden esnek ve kolay bir şekilde ihtiyaç duyulan eğitimler alınabilir [6]. Bu sistemler için de öğrenci takibi, sistemin kalitesinin ve kullanılabilirliğinin artırılmasında önemli yer tutar. Doğru yönlendirilmeyen öğrenciler eğitimlerden yeterli faydayı sağlayamazlar ve bu sistemlerin kullanımını düşer.

Erken not tahmini öğrencinin performansını arttırmada oldukça etkilidir ve öğrenci gelişimini izleme konusunda bir çözüm olarak düşünülebilir [4]. Günümüzde öğrencilerin eğitim bilgileri ile ilgili çok fazla veri kayıt edilebilmektedir. Bu verilerin çeşitliliği ve boyutu sürekli ve hızlı bir şekilde artmaktadır [7]. Bu veriler ile farklı yöntemler kullanılarak çıkarımlar ve geleceğe dönük tahminler yapılabilir. Makine öğrenmesi yöntemlerinin son zamanlarda yaygınlaşması ve birçok alanda başarılı bir şekilde uygulanması ile birlikte bu yöntemlerin öğrenci performansı analizi alanında da kullanımı oldukça yaygındır. Makine öğrenmesi teknikleri yardımı ile geçmiş öğrenci performansının analizi, öğrencilerin gelecek performansları hakkında bir perspektif verebilmektedir [4 ve 6]. Bu teknikler ile öğrenci not tahminleri yapılabilir, öğrenci performansı artırılabilir ayrıca öğretmene dersin gidişatı hakkında faydalar sağlayabilir [4].

Ders boyunca yapılan kısa sınavlar, ödevler ve projeler öğrencilerin performansını izlemek ve hem öğrencilere hem de öğretmenlere geri bildirim vermek adına yararlıdır. Verilen derse aktif katılımın, yapılan kısa sınavlar ile ölçülebileceği değerlendirilebilir. Çünkü kısa sınavın girebilmesi için öğrencilerin öncelikle derse katılması gerekmektedir. Ayrıca öğrencilerin kısa sınavlardan iyi bir not alabilmesi için derse gelmeden önce hazırlık yapmaları, dersi aktif olarak dinlemeleri ve derse etkili bir şekilde dikkatlerini vermeleri gerekir. Dönem boyunca verilen ödevler ve projeler öğrencilerin derse ilgisini artırır. Öğrencilerin dersi takip etmelerini ve derse çalışıp araştırma yapmalarını kolaylaştırır.

Bu çalışmada, yukarıda önemli bahsedilen eğitim performansını artırma amacıyla Bilkent Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü'nde verilen Programlama Dilleri (CS315) dersi kapsamında yapılan kısa sınavların, ödevlerin ve projelerin dönem sonu sınavına olan etkisi incelenmiştir. Çalışmada 2017 ve 2018 yıllarında ve farklı öğretmenlerden bu dersi alan yedi şubenin 330 öğrenciye ait not bilgileri kullanılmıştır. İlk olarak, öğrenci verilerinden kısa sınav bilgileri ile dönem sonu sınav notu tahmin edilmeye çalışılmış, sonrasında birçok farklı makine öğrenmesi yöntemleri kullanılarak kısa sınavların, ödevlerin ve projelerin ayrı ayrı ve birlikte dönem sonu sınav notuna etkisi gösterilmeye çalışılmıştır.

Çalışma organizasyonu şu şekildedir: ikinci bölümde alanyazı taraması sonuçları sunulmuş ve ilgili çalışmalar hakkında bilgiler verilmiştir. Üçüncü bölümde kullanılan makine öğrenmesi yöntemleri hakkında kısa bilgiler verilmiştir. Kullanılan veri kümesi hakkında detaylı bilgiler ve veri kümesinde yapılan ön hazırlık işlemleri dördüncü bölümde anlatılmıştır. Beşinci bölümde yapılan deneyler ve sonuçları detaylı bir şekilde sunulmuştur. Çalışma, sonuçlar ve gelecek çalışmaların değerlendirilmesiyle sonlandırılmıştır.

2. İlgili Çalışmalar

Alanyazında eğitim performansını ölçme ve artırma adına farklı yöntemler kullanan birçok çalışma vardır. Rao vd. öğrencilerin öğrenme performansını sınıflandırma yöntemi ile tahminlemeye çalışır ve öğrencileri dört sınıfa ayırır [1]. Çalışmada J48, Naïve Bayesian sınıflandırma ve Random Forest algoritmaları kullanılıp karşılaştırılmıştır. Random Forest algoritması en iyi sonucu vermiştir. Büyüklüğü 200 civarı olan

veri kümesinde nümerik değerlerden çok gruplanmış değerler vardır. Kabul tipi, cinsiyet, eğitim materyali, aile geliri gibi sosyal ve demografik 20 öznitelik (Ing. feature) dikkate alınmıştır.

Karar Ağaçları (Decision tree) yöntemi de eğitim performansı alanında kullanılmıştır. Bu yöntem ile kurallar üretilerek tahminler yapılabilir. Örneğin Al-Radaidehdv yapılan çalışmada üniversite öğrencilerinin C++ programlama dersinin 2005 yılı verileri kullanılarak, ders notları harf grupları olarak ön görülemeye çalışılmıştır [2]. Öğrenme işleminde 12 öznitelik kullanılmıştır. Çalışmada elde edilen sonuçların değerleri yeterince yüksek bulunmamış olup bunun sebebi yeterli verinin olmayışına bağlanmıştır. Khanyine Karar Ağaçları yöntemini kullanmış ve ortaokul öğrencilerinin önceki verileri kullanılarak ders geçme notu yine harf cinsinden tahminlenmeye çalışmıştır [8]. Çalışmada yaklaşık olarak %85 oranında doğru sınıflandırma başarısı elde edilmiştir.

Yapay Sinir Ağları bu alanda kullanılan bir başka makine öğrenmesi yöntemidir. Örneğin Agrawal ve Mavani öğrencilerin performans düzeylerini zayıf, orta, iyi ve çok iyi şeklindeki gruplar olarak öngörülemeye çalışmıştır [9]. Okubovd tarafından yapılan çalışmada ise öğrencilerin kısa sınav skorları tahmin edilmeye çalışılmıştır [3]. Veri kümesi olarak 2693 öğrencinin 10 farklı öğretmen tarafından verilen 15 derste derse katılım, aksiyonlar gibi kayıt verileri dikkate alınmıştır.

Kim ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada çevrimiçi kurs sitelerinden biri olan Udacity'den öğrenci verileri için Derin Öğrenme yöntemi kullanılarak öğrenci performans tahmini yapılmıştır [10]. Pandey ve arkadaşlarının çalışmasında Bayes sınıflandırma yöntemi kullanılarak öğrencilerin önceki yıl verilerinden öğrenci performansı tahminlemeye çalışılmış, öğrenciler iki sınıf olarak gruplandırılmıştır [11]. Yadav ve Pal tarafından yapılan çalışmada ise mühendislik öğrencilerinin önceki yıl sınavlarından dönem sonu sınavı performansı tahminlemeye çalışılmıştır [7]. Öğrenciler 3 sınıf olarak gruplandırılmıştır. ID3, C4.5, ve CART karar ağacı ile sınıflandırma algoritmaları kullanılmış ve karşılaştırılmıştır. Çalışmaya göre C4.5 algoritması en iyi sonucu vermiştir.

Gadhavi ve Chirag tarafından gerçekleştirilen çalışmada tek öznitelik dikkate alınarak lineer regresyon modeli kullanılmıştır [6]. Öğrenci geçme notu, yapılmış testlerin ortalama verisi ile tahminlenmeye çalışılmıştır. Collaborative Filtering, Matrix Factorization ve Restricted Boltzmann Machines (RBM) yöntemleri ile üniversite öğrencilerinin akademik performansları tahmin etmeye çalışılmış [4], en iyi sonucu RBM yöntemi ile elde etmiştir. Veri kümesi 225 öğrencinin üç yıllık verilerinden oluşmaktadır. Verinin içeriği öğrencilerin ortaokul bilgilerinden, lise bilgilerinden, mülakat bilgilerinden, girilmiş test sonuçlarından ve diğer derslerden alınmış notlardan oluşmaktadır. Çalışmada birçok farklı derse göre değerlendirme yapılmıştır.

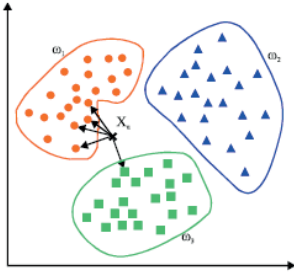
3. Kullanılan Makine Öğrenmesi Yöntemleri

Bu bölümde Makine Öğrenmesi konusunda bilgi verildikten sonra çalışmada kullanılan KNN (K-Nearest Neighbors) (En Yakın Komşu), Lineer Regresyon, Lojistik Regresyon, SVM (Support Vector Machines) (Destek Vektör Makineleri), Lineer SVM ve MLP (Multi-layer Perceptron) (Çok Katmanlı Algılayıcılar) yöntemleri hakkında kısa bilgi verilmiştir.

Makine öğrenmesi, insan zekasının benzerinin yapımını amaçlayan Yapay Zekânın bir alt alanıdır ve bilgisayar yazılımlarının öğrenmesini sağlayan teknoloji olarak düşünülebilir [12 ve 13]. Makine öğrenmesinde yazılımların verilere göre davranışı açıkça programlanmadan eldeki

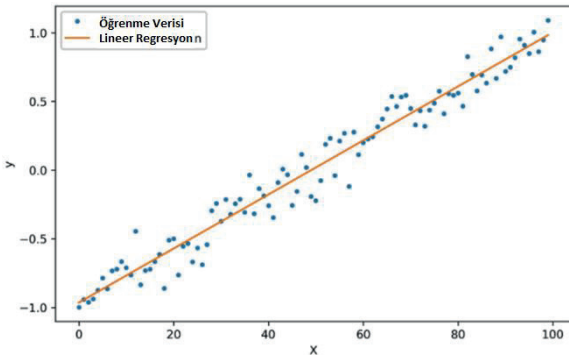
verilerden öğrenilen modeller ile gelecek verilerin tahminlenmesi sağlanır. Makine Öğrenmesi, bir problemin çözümünün ilgili ortamdan edinilen verilere göre modellenmesidir [12]. Son yıllarda oldukça yoğun çalışılan bir konu olan makine öğrenmesi bankacılık, alışveriş, reklamcılık, filtreleme, güvenlik, sosyal medya gibi birçok alanda çok çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır [14]. Makine öğrenmesi amacıyla kullanılan birçok yöntem ve algoritma vardır. Bazı yaklaşımlar tahmin yaparken, bazı yaklaşımlar sınıflandırma yapar. Bu yöntemler probleme veya eldeki verilere göre değişen farklı başarılarla sahip olabilirler. Makine öğrenmesi algoritmaları girdi verilerini dikkate alarak, çıktı değerlerini kabul edilebilir bir aralıkta tahmin etmek için kullanılır. Farklı algoritmalar, farklı özellikler ve farklı veriler ile çeşitli denemeler yapılarak en iyi model oluşturulmaya çalışılır.

KNN yöntemi öznitelik uzayındaki en yakın eğitim örneklerine dayanarak nesnelere sınıflandıran örüntü tanıma yöntemlerinden birisidir [15]. Bu yöntemde sınıflandırılmak istenen yeni örnek için, daha önceki sınıflandırılmış örneklerden k tanesinin her birinin yakınlığına bakılarak sınıflandırma yapılır [16]. Yeni örnek kendisine en yakın sınıfa dâhil edilir. Bu işlem sırasında k değişkeni örneğe en yakın olan k adet sınıf nitelikleri belli olan örneklerin sayısını belirtir. Yakınlık hesabında genelde öklit mesafesi kullanılır. KNN yöntemi kullanılarak yapılmış örnek bir sınıflandırma Şekil 1’de gösterilmiştir.



Şekil 1. Örnek Bir KNN Sınıflandırması [17]

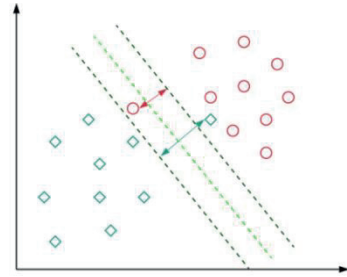
Lineer Regresyon iki değişken arasındaki ilişkiyi ölçmek için kullanılan makine öğrenmesi yöntemlerinden biridir [18]. Bu yöntemde iki değişken arasındaki bağlantıya en yakın doğrusal sonuç elde edilir. Örnek verilerinin mümkün olan en çoğunu kapsayacak şekilde geçecek bir doğru denklemi elde edilir. Bu denklem ile gelecekteki veriler öngörülür. Öznitelik sayısı birden fazla olursa Multilineer Regresyon olarak isimlendirilir. Lojistik Regresyon ise, çok değişkenli verileri sınıflandırmak için kullanılır [19]. Bağımlı değişkenin kategorik olduğu durumlar için (Örneğin Not durumu iyi veya kötü gibi) çok uygun bir yöntemdir. Örnek bir regresyon modeli Şekil 2’de gösterilmiştir.



Şekil 2. Örnek Bir Lineer Regresyon Modeli [20]

SVM bir düzlemde bulunan iki sınıfı bir sınır ile ayırarak sınıflandırır [21]. Sınıflandırma için, bir düzlemde bulunan örnekler arasında bir sınır çizerek örnekleri iki gruba ayırır. Bu sınırın çizileceği yer iki grubun da üyelerine en uzak olan yerdir. Sınırın çizilmesi için iki gruba da yakın ve birbirine paralel iki çizgi çizilir ve bu çizgiler birbirine yaklaştırılarak sınır çizgisi üretilir. Özetle veriyi birbirinden ayırmak için en uygun fonksiyon tahmin edilmeye çalışılır [15]. Sınıflandırma için lineer bir sınır bulunamazsa, veriler başka birçok boyutlu uzaya taşınarak sınır aranır.

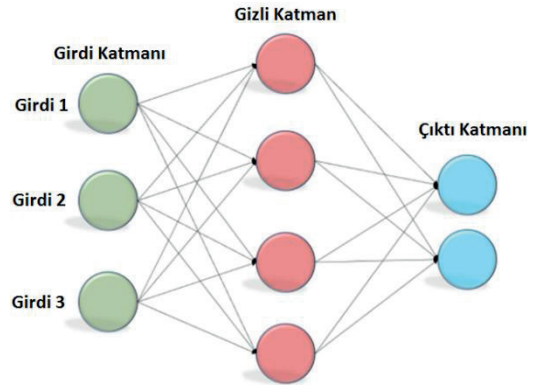
Lineer SVM, SVM’de kullanılan çekirdeğin lineer olarak seçilmiş halidir. SVM yönteminin basit bir yapısının olması ve uygulamalarda yüksek performans sağlaması nedenleri ile kullanımı yaygındır. Örnek bir SVM modeli Şekil 3’te gösterilmiştir.



Şekil 3. Örnek Bir SVM Modeli [22]

MLP sınıflandırma yönteminde algılayıcılar Yapay Sinir Ağı modelidir [23]. Yapay sinir ağları; insan beynini özelliklerini taklit etmeye dayanır. Öğrenme yolu ile yeni bilgiler türetebilme, yeni bilgiler oluşturabilme ve keşfedebilme gibi yetenekleri otomatik olarak gerçekleştirmeye çalışır [15].

Eşik değerleri kullanılarak sınıflandırma yapılabilir. Çok katmanlı algılayıcılarda, bilgi girişinin yapıldığı girdi katmanı, bir veya daha fazla gizli katman, bir çıktı katmanı ve katmanlar arası ileri-geri yayılım olarak adlandırılan geçişler bulunur. Örnek bir MLP modeli Şekil 4’te gösterilmiştir.



Şekil 4. Örnek Bir MLP Modeli [24]

4. Veri Ön Hazırlık İşlemleri

Makine öğrenmesi yöntemleri kullanılmadan önce veri kümesi hazırlanmıştır. Veriler Bilkent Üniversitesi Not Giriş Sistemi (STARS-AIRS) üzerinden indirilmiştir. 2017 ve 2018 yıllarındaki toplam 7 şubenin not bilgilerinden oluşan veri kümesinde öğrenci numara, isim, soy isim bilgileri, dönem boyunca gerçekleştirilmiş en az beş kısa sınav notu, iki proje notu, üç ödev notu, bir ara sınav notu, dönem sonu sınav notu,

tüm notların dönem sonu notuna olan ağırlık bilgileri ve dönem sonu notu yer almaktadır.

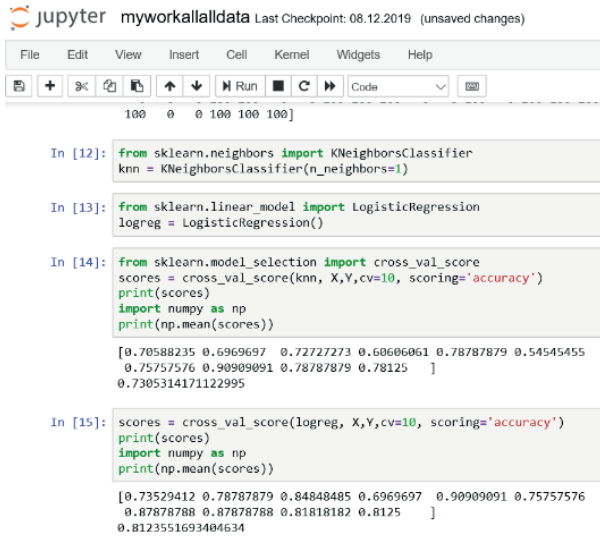
Öncelikle tüm veriler tek dosyada birleştirilmiştir. Daha sonra kullanılmayacak ve gereksiz olan veriler ve öğrencileri tanımlayan tüm bilgiler (numara, isim, soy isim) silinmiştir. Tüm notların dönem sonu notuna olan ağırlık bilgileri de kullanılmayacağından veri kümesinden silinmiştir. Ara sınav notu ile ilgili bir deney şimdilik olmadığından ve bu tür bir deney gelecek çalışma olarak bırakıldığından bu veri sütunu da veri kümesinden çıkarılmıştır. Dönem sonu notu bilgisi belli ağırlıklarla kısa sınav, ödev, proje, ara sınav ve dönem sonu sınavına bağlı bir değişken olduğundan deneylerde dikkate alınmamıştır.

Gereksiz veriler temizlendikten sonra veri satırlarındaki eksiklikler giderilmiştir. Olmayan veri değerleri için sıfır değeri girilmiştir. Örneğin bir kısa sınav notuna katılmayan veya teslim edilmemiş ödevler için öğrencinin ilgili not hücrelerinde veri yoksa sıfır değeri girilmiştir.

Tüm hazırlık işlemleri sonucunda veri kümesi yapımız en az beş kısa sınav notu, üç ödev notu, iki proje notu ve dönem sonu sınav notu olmak üzere 330 satır ve on bir sütundan oluşmaktadır.

5. Deneyler

Deneyler Python programlama dili [25] ve o dilde hazırlanmış olan makine öğrenmesi kütüphaneleri kullanılarak yapılmıştır. Geliştirme ortamı olarak Anaconda - Jupyter yazılım ortamı [26] kullanılmıştır. Örnek bir çalışma ortamı Şekil 5'te gösterilmiştir. Deneyler iki kısımdan oluşmaktadır. İlk olarak Lineer Regresyon yöntemi ile kısa sınav notlarından dönem sonu sınav notu tahmini yapılmış, daha sonra farklı birçok makine öğrenmesi yöntemleri ile ve farklı öznitelikler kullanılarak özniteliklerin dönem sonu sınav notuna etkisi anlaşılmasına çalışılmıştır.



```

jupyter myworkkallalldata Last Checkpoint: 08.12.2019 (unsaved changes)
File Edit View Insert Cell Kernel Widgets Help
100 0 0 100 100 100]

In [12]: from sklearn.neighbors import KNeighborsClassifier
knn = KNeighborsClassifier(n_neighbors=1)

In [13]: from sklearn.linear_model import LogisticRegression
logreg = LogisticRegression()

In [14]: from sklearn.model_selection import cross_val_score
scores = cross_val_score(knn, X,Y,cv=10, scoring='accuracy')
print(scores)
import numpy as np
print(np.mean(scores))

[0.70588235 0.6969697 0.72727273 0.60606061 0.78787879 0.54545455
0.75757576 0.90909091 0.78787879 0.78125 ]
0.7305314171122995

In [15]: scores = cross_val_score(logreg, X,Y,cv=10, scoring='accuracy')
print(scores)
import numpy as np
print(np.mean(scores))

[0.73529412 0.78787879 0.84848485 0.6969697 0.90909091 0.75757576
0.87878788 0.87878788 0.81818182 0.8125 ]
0.8123551693404634
    
```

Şekil 5. Örnek Çalışma Ortamı

5.1 Lineer Regresyon Yöntemi ile Kısa Sınav Notlarından Dönem Sonu Sınav Notu Tahmini

Deney için “qort” ve “kator” isimli iki öznitelik kullanılmıştır. Veri kümesindeki şubeden şubeye değişen ve en az beş tane yapılmış kısa sınav notlarından ortalama ve yüzde olarak katılım oranı hesaplanmıştır. “qort”, öğrencilerin kısa

sınav notlarının ortalamasını, “kator” ise öğrencilerin kısa sınavlara katılım oranını temsil etmektedir. Belirtilen iki öznitelik ayrı ayrı ve birlikte kullanılarak toplam üç deneyde tahmin edilmeye çalışılacak bilgi ise dönem sonu sınav notudur. Veri kümesinden ilgili sütunlar oluşturulduğunda oluşan örnek veri Tablo I’de gösterilmiştir.

TABLO I. İlk Deney İçin Hazırlanmış Veri Örneği (2 öğrenci için)

Veri No	qort	kator	Final
0	86	88	39
1	97	75	39

Bu verilerin birbirleri ile olan korelasyonu ise Tablo II’de gösterilmiştir.

TABLO II. Özniteliklerin Korelasyon Matrisi

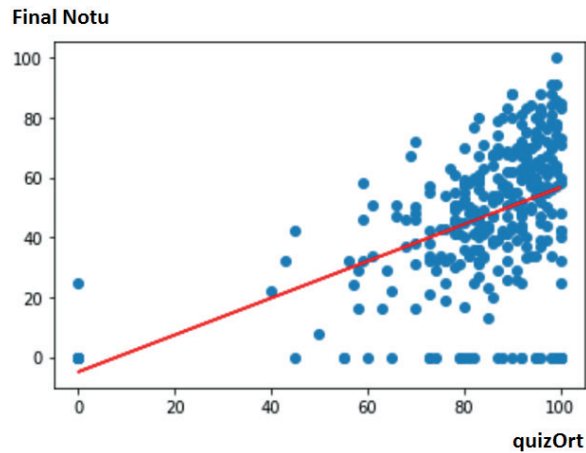
	qort	kator	Final
qort	1	0.406	0.470
kator	0.406	1	0.571
Final	0.470	0.571	1

5.1.1 İki Öznitelik Birlikte Kullanılarak Multilineer Regresyon Yöntemi İle Final Notu Tahmini

İlk iki öznitelik ve dönem sonu sınavından oluşan veri kümesi %80 i öğrenme verisi %20 si test verisi olarak bölünmüştür. Öğrenme verisi kullanılarak Multilineer Regresyon yöntemiyle model öğrenildikten sonra model test verisi ile denendiğinde ortalama skor sonucu 0.43 olarak bulunmuştur.

5.1.2 Kısa Sınav Notu Ortalaması Özelliği Kullanılarak Lineer Regresyon Yöntemi İle Final Notu Tahmini

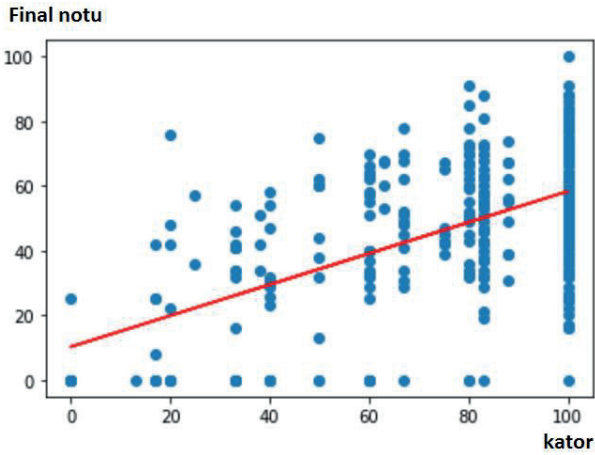
Kısa sınav notu ortalaması özneliği ile model öğrenildikten sonra test edildiğinde başarı olasılığı 0.22 olarak bulunmuştur. Elde edilen modelin katsayıları yaklaşık olarak -4.96 ve 0.62 olarak bulunmuştur. Model için bulunmuş regresyon doğrusu $Final\ notu = -4.96 * quizOrt + 0.6$ şeklindedir ve Şekil 6’da gösterilmiştir.



Şekil 6. Kısa Sınav Notu Ortalaması Özelliği İle Oluşturulmuş Denklem

5.1.3 Kısa Sınavlara Katılım Oranı Özelliği Kullanılarak Lineer Regresyon Yöntemi İle Final Notu Tahmini

Kısa sınavlara katılım oranı özelliği ile model öğrenildikten sonra test edildiğinde başarı olasılığı 0.33 olarak bulunmuştur. Elde edilen modelin katsayıları yaklaşık olarak 10.29 ve 0.48 olarak bulunmuştur. Model için bulunmuş regresyon doğrusu $Final\ notu = 10.29 * kator + 0.6$ şeklindedir ve Şekil 7'de gösterilmiştir.

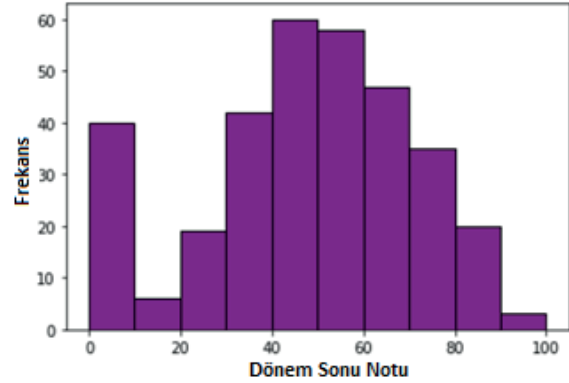


Şekil 7. Kısa Sınavlara Katılım Oranı Özelliği İle Oluşturulmuş Denklem

5.2 Makine Öğrenmesi Yöntemleri ile Farklı Özniteliklerin Dönem Sonu Sınav Notuna Etkisi

Bu kısımda anlatılan deneylerde makine öğrenmesi yöntemleri ile ve farklı öznitelikler kullanılarak özniteliklerin dönem sonu sınav notuna etkisi araştırılmıştır. Veri kümesindeki üç farklı yarıyla ait toplam yedi şubenin yapılan kısa sınav sayıları değişkenlik göstermektedir. Tüm şubelerde en az beş kısa sınav yapıldığından beşten fazla kısa sınav yapılan şubeler için ilk beş kısa sınav notu dikkate alınmıştır.

Beş kısa sınav notu, üç ödev notu, iki proje notu ve dönem sonu sınav notu sütunlarından oluşan veri kümesi 330 öğrenciye ait veriden oluşmaktadır. Veri sayısının az oluşu nedeni ile yapılacak dönem sonu sınav notu iki sınıfa ayrılmıştır. Dönem sonu sınav notu ortalamasından büyük olan değerler için "yüksek", kalan değerler için "düşük" olmak üzere iki sınıf belirlenmiştir. Öğrencilerin dönem sonu sınav not dağılımını gösteren histogram Şekil 8'de gösterilmiştir.



Şekil 8. Dönem Sonu Sınav Notu Dağılımı

Kısa sınav notu, ödev notu ve proje notu öznitelikleri ile ayrı ayrı ve birlikte kullanılarak farklı makine öğrenmesi yöntemleri sonucunda dönem sonu sınav notu sınıflandırılmıştır. Deneylerde kullanılan öznitelikler Tablo III'te gösterilmiştir.

TABLO III. Deneylerde Kullanılan Öznitelikler

Deney No	Öznitelik Sayısı	Öznitelikler
1	2	Kısa Sınav Notu Ortalaması, Kısa Sınav Katılım Ortalaması
2	5	5 Kısa Sınav Notu
3	3	3 Ödev Notu
4	2	2 Proje Notu
5	10	5 Kısa Sınav, 3 Ödev, 2 Proje Notu

Sınıflandırma sonuçları 10 katlı çapraz değerlendirme test yöntemi ile elde edilmiştir. Elde edilen sınıflandırma sonuçları kullanılan öznitelikler ve makine öğrenmesi yöntemlerine göre yüz üzerinden Tablo IV'te gösterilmiştir.

TABLO IV. Sınıflandırma Sonuçları

Deney No	1	2	3	4	5	Yöntem Ortalaması
KNN	69	69	72	72	73	71
Lojistik Regresyon	75	76	80	76	81	78
Lineer Regresyon	60	70	78	69	71	70
SVM	75	70	77	72	68	72
MLP	69	77	66	68	52	66
Deney Ortalaması	70	72	75	71	69	

Tablo IV'te gösterildiği gibi makine öğrenmesi yöntemlerinin deney sonuç ortalamaları ve deneylerin ortalaması belirtilmiştir. Buna göre tüm deneylere göre en iyi performans ortalaması %78 değerle Lojistik Regresyon yöntemidir. Deneylerin yöntemlere göre ortalamasına göre %75 ile ödev notlarının öznitelik olarak kullanıldığı üç numaralı deney en iyi performans ortalamasını göstermiştir. Tüm deneyler ve makine

öğrenmesi yöntemlerine göre en iyi performans, tüm özniteliklerin kullanıldığı Lojistik Regresyon makine öğrenmesi yöntemi ile %81 olarak elde edilmiştir.

6. Sonuçlar ve Değerlendirme

Bu çalışmada kısa sınavların, ödevlerin ve projelerin dönem sonu sınavına olan etkisi araştırılmıştır. Bilkent Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü'nde verilen Programlama Dilleri dersini farklı öğretmenlerden almış toplam 330 öğrenci verisi ele alınmıştır. Bu veri kümesinde ön hazırlık işlemleri yapılmış, ilgili öznitelikler elde edilmeye çalışılmıştır. Öncelikle öğrencilerin kısa sınav bilgilerinden elde edilen öznitelikler ile Lineer Regresyon yöntemi ile dönem sonu sınavı denklemi oluşturulmaya çalışılmıştır. Sonrasında öğrencilerin kısa sınav, ödev ve proje bilgileri ile bu bilgilerden bağımsız olan dönem sonu sınav notu KNN, Lineer Regresyon, Lojistik Regresyon, Lineer SVM, SVM ve MLP makine öğrenmesi yöntemleri ile sınıflandırılmaya çalışılmıştır. Bu kısımda her öznitelik kümesine ve uygulanan her makine öğrenmesi yöntemine göre elde edilen sonuçlar karşılaştırılmış ve analiz edilmiştir. Ayrıca kullanılan her bir makine öğrenmesi yöntemi hakkında bilgiler verilmiştir.

Veri boyunun büyüklüğü dikkate alındığında elde edilen sonuçlar tatmin edicidir. Sonuç olarak dönem sonu sınav sonucu için oluşturulan lineer denklemin başarısı düşük olsa da seçilen özniteliklerin dönem sonu sınav notu ile ilgili olduğu ve bu özniteliklere göre dönem sonu sınav notunun başarılı olarak sınıflandırıldığı gözlemlenmiştir.

Gelecek çalışma olarak, başka derslerden de benzer bilgilerin toplanarak veri kümesinin artırılması ve bu sayede dönem sonu sınav sonucu için oluşturulan denklemin iyileştirilmesi planlanmaktadır. Ayrıca ara sınav notu üzerinde de analizler yapmak ve kısa sınav, ödev ve proje bilgilerini ara sınav öncesi ve sonrası ayırarak daha detaylı analizler yapmak hedeflenmiştir. Başka ders verilerine göre elde edilmiş sonuçları da birbirleri ile karşılaştırmak yine geliştirilmesi planlanan başka bir hedefdir. Son olarak araştırılmak istenen bir diğer çalışma da kısa sınav, ödev ve proje bilgilerinin her birinin dönem sonu sınav notuna pozitif mi yoksa negatif mi etkisi olduğunu ölçmeye çalışmaktır.

Kaynaklar

- [1] Rao, K. Prasada, M. C. Rao ve B. Ramesh. "Predicting learning behavior of students using classification techniques", International Journal of Computer Applications, 139.7: 15-19, 2016.
- [2] Al-Radaideh, Q. A., Al-Shawakfa, E. M. ve Al-Najjar, M. I., "Mining student data using decision trees." International Arab Conference on Information Technology, Yarmouk University, Jordan. 2006.
- [3] Okubo, F., Yamashita, T., Shimada, A., Taniguchi, Y. ve Konomi, S., "On the prediction of students' quiz score by recurrent neural network", CEUR Workshop Proceedings, 2163, 2018.
- [4] Iqbal, Z., Qadir, J., Mian, A. ve Kamiran, F., "McGraw Hill, 199: A Case Study", 2017.
- [5] Udemy, <https://www.udemy.com/>, [Erişim: 25.05.2020].
- [6] Gadhavi, M. ve Chirag, P., "Student final grade prediction based on linear regression" Indian J. Comput. Sci. Eng. 8.3: 274-279, 2017.
- [7] Yadav, S. K. ve Pal, S., "Data mining: A prediction for performance improvement of engineering students using classification", World of computer science and information technology journal, 2(2), pp. 51-56, 2012.
- [8] Khan, B., Khiyal, M. S. H. ve Khattak, M.D., "Final grade prediction of secondary school student using decision tree.", International Journal of Computer Applications 115.21, 2015.
- [9] Agrawal, H. ve Mavani, H., "Student performance prediction using machine learning." International Journal of Engineering Research and Technology, 4.03: 111-113. 2015.
- [10] Kim, B., Vizitei, E.ve Ganapathi, V., "GritNet: Student performance prediction with deep learning." arXiv preprint arXiv:1804.07405, 2018.
- [11] Pandey, U. K. ve Saurabh, P., "Data Mining: A prediction of performer or underperformer using classification", International Journal of Computer Science and information technology, 2(2), pp. 686-690, 2011.
- [12] Mitchell, T., "Machine Learning", McGraw Hill, 1997.
- [13] Nabiyev, Vasif V., "Yapay zeka: problemler-yöntemler-algoritmalar", Seçkin Yayıncılık, 2005.
- [14] Öztemel, E., "Yapay sinir ağları", Papatya Yayıncılık, İstanbul, 2003.
- [15] Karakoyun, M. ve Hacıbeyoğlu, M., "Biyomedikal Veri Kümeleri ile Makine Öğrenmesi Sınıflandırma Algoritmalarının İstatistiksel Olarak Karşılaştırılması", Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, 2014.
- [16] Liao, Y.ve Vemuri, V. R., "Use of k-nearest neighbor classifier for intrusion detection", Computers ve security, 21(5), 439-448, 2002.
- [17] KNN Classifier, <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/63621-knn-classifier?focused=7902851&tab=function>, [Erişim: 25.05.2020].
- [18] Seber, G. A.ve Lee, A. J., "Linear regression analysis", Vol. 329, John Wiley & Sons, 2012.
- [19] Wright, R. E., "Logistic regression", 1995.
- [20] How to do Linear Regression and Logistic Regression in Machine Learning?, <https://mlfromscratch.com/machine-learning-introduction-8-linear-regression-and-logistic-regression/#/>, [Erişim: 25.05.2020].
- [21] Shawe-Taylor, J. ve Cristianini, N., "Support vector machines. An Introduction to Support Vector Machines and Other Kernel-based Learning Methods", 93-112, 2000.
- [22] Support Vector Machines, <https://towardsdatascience.com/support-vector-machines-soft-margin-formulation-and-kernel-trick-4c9729dc8efe>, [Erişim: 25.05.2020].
- [23] J. A. Freeman ve D. M. Skapura, "Neural Networks Algorithms", Applications and Programming Techniques. New York, USA: Addison-Wesley Publishing Company, 1991.
- [24] Multi Layer Perceptron (MLP) Models on Real World Banking Data, <https://becominghuman.ai/multi-layer-perceptron-mlp-models-on-real-world-banking-data-f6dd3d7e998f>, [Erişim: 25.05.2020].

- [25] Python Programlama Dili, <https://www.python.org>,
[Erişim: 25.05.2020].
- [26] Anaconda Yazılım Ortamı, <https://www.anaconda.com>,
[Erişim: 25.05.2020].

Karani KARDAŞ



Karani Kardeş, 1981 yılı Diyarbakır doğumludur. İlköğrenimini Diyarbakır'da orta ve lise öğrenimini ise İzmir'de tamamladı. 2003 yılında Ege Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü'nden lisans, sırasıyla 2007 ve 2018 yıllarında ODTÜ Bilgisayar Mühendisliği Bölümü'nden yüksek lisans ve doktora derecelerini aldı. 2018 yılında Bahçeşehir Üniversitesi İşletme Bölümü'nden yüksek lisans derecesini aldı. 2003 yılından beri Havelsan'da Coğrafi Bilgi Sistemleri konusu ağırlıklı olmak üzere farklı projelerde yer aldı. Coğrafi Bilgi Sistemleri ve Makine Öğrenmesi; üzerinde çalıştığı konulardandır. Ayrıca Bilkent Üniversitesi'nde Yarı Zamanlı Öğretim Görevlisi olarak Programlama Dilleri ve Veritabanı Yönetim Sistemleri derslerini vermektedir.

Prof. Dr. H. Altay GÜVENİR



H. Altay Güvenir, 1957 yılında Bursa'da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Bursa'da tamamladı. Lisans ve yüksek lisans eğitimini İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik Fakültesi, Elektronik ve Haberleşme Bölümünde, sırasıyla 1979 ve 1981 yıllarında tamamladı. 1979 -1982 yılları arasında İTÜ Elektrik Fakültesi, Telekomünikasyon kürsüsünde asistan olarak görev yaptı. Kazandığı Milli Eğitim Bakanlığı doktora bursuyla, 1982-1987 yılları arasında, ABD'deki Case Western Reserve Üniversitesinde Bilgisayar Mühendisliği ve Bilimleri alanında doktora çalışmalarını tamamladı. 1987-1988 yılları arasında Hacettepe Üniversitesi Bilgisayar Bilimleri ve Mühendisliği Bölümünde yardımcı doçent olarak görev yaptı. 1988 yılında yardımcı doçent olarak çalışmaya başladı. İ. D. Bilkent Üniversitesinde 1994 yılında doçent 2001 yılında profesör oldu. 2001 - 2019 yılları arasında Bilgisayar Mühendisliği Bölümünün başkanlığını yaptı. 1999 yılında TÜBİTAK Hüsamettin Tuğaç Vakfı Birincilik Ödülünü, 2020 yılında İ. D. Bilkent Üniversitesi Eğitimde Üstün Başarı Ödülünü aldı. 2015 yılından buyana Bilkent-TÜSİAD Bilgi Toplumu Forumu'nun direktörlüğünü yürütmektedir. Araştırma alanları yapay zekâ ve makine öğrenmesidir.

Türk Kahvesi Pişirme Süreci İçin Algılayıcı Tabanlı Bir Kontrol Yöntemi

A Sensor Based Control Method for Turkish Coffee Cooking Process

Arda Dönerkayalı^{1,2} , Türker Türker^{1,3} 

¹Yıldız Teknik Üniversitesi Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği,
Elektrik-Elektronik Fakültesi, İstanbul, Türkiye
arda.donerkayali@arcelik.com

turker@yildiz.edu.tr

²Arçelik A.Ş. İstanbul, Türkiye

³School of Engineering and Technology
Al Dar University College, Dubai, BAE

Öz

Son yıllarda gerçekleşen teknolojik ilerlemeler ile birlikte heterojen gıda karışımlarını otomatik olarak pişirebilen makineler geliştirilmektedir. Bu makinelerde geliştirilen algılayıcı sistemler pişirme işleminin kontrolünün hassas olarak sağlanması ve ürünün başarısı için kritik bir rol oynamaktadır. Piyasada önemli bir yer tutan bu ürünler çeşitli algılayıcı sistemlere sahip olmakla birlikte, buhar, sıcaklık ve algılayıcı üzerinde meydana gelen yoğunlaşma gibi etkilere maruz kaldığında hatalı kararlar vererek, sürdürülebilir bir performans sunmakta zorlanmaktadır. Bu çalışmada, induksiyon ısıtıcılı bir otomatik Türk kahvesi makinesinde, pişirici haznesinin dışına yerleştirilen bir sıcaklık algılayıcısı yardımıyla karışımın sıcaklığını temassız bir şekilde kestirebilen bir durum gözleyici modeli sunulmaktadır. Ayrıca, gerçek zamanlı deneylerden elde edilen veriler kullanılarak bir dinamik model oluşturulmuştur. Kahve sıcaklığının hazne içerisine algılayıcı yerleştirilerek elde edildiği deney çalışmaları gerçekleştirilerek önerilen sistem test edilmiştir. Oluşturulan model gerçek karışımın sıcaklığını 25°C ve 90°C aralığında %96.63 doğruluk ile kestirmektedir. Bu sonuçlara göre, önerilen algılama yöntemi kullanılarak istenilen tat ve kıvamına sahip Türk kahvesi pişirilebilmektedir.

Anahtar kelimeler: Sıcaklık kontrolü, induksiyon ile pişirme, durum kestirimi, sistem tanıma.

Abstract

Due to the recent technological advancements, autonomous cookers are being developed for heterogeneous food mixtures. Advanced sensing systems play a critical role in such appliances to ensure a precise control of the cooking process and a successful operation. Such devices are of high demand among the consumers and they are built upon various systems for sensing. However, the sensing systems might encounter major difficulties if exogenous disturbances such as steam,

heat or condensation on the sensor exist. This situation may lead to false executions and problems in providing sustainable performance. In this study, a state observer model is developed for an automatic Turkish coffee machine possessing an induction heater. This model can be used to estimate the temperature of the mixture with only one temperature sensor placed outside the cooking chamber. In addition, a dynamic model is constructed utilizing the data acquired by real time coffee making experiments. The proposed structure is tested by placing a temperature sensor inside the cooking chamber. The constructed model estimates the actual temperature of the mixture within an interval of 25°C and 90°C with %96.63 accuracy. According to these results, Turkish coffee with the desired taste and consistency can be cooked using the recommended sensing method.

Keywords: Temperature control, induction cooking, state estimation, system identification.

1. Giriş

Tüm dünyada tüketilmekte olan kahvenin tarihçesi 14. yüzyıla dayanmaktadır [1]. Afrika'da yetişen kahve bitkisinin tohumları 16. yüzyılda İstanbul'a ulaşmıştır. 17. yüzyılda Avrupa genelinde, 18. yüzyılda ise dünya genelinde tanınan kahve, 19. yüzyılda oldukça önemli bir ticaret ürünü haline gelmiştir. İstanbul'a ulaştığında kahvenin kavrulma, pişirilme ve sunulma yöntemleri farklılaşarak bugünkü Türk kahvesi olarak isimlendirilen haline dönüşmüştür [2]. Türk kahvesi, su ile karıştırılarak elde edilen heterojen karışımın bir ısı kaynağı yardımıyla yavaşça pişirilmesiyle hazırlanmaktadır. Demlenme sonunda kaynama noktasına yaklaşarak yavaşça kabaran kahve 85°C ile 95°C arasındaki bir sıcaklıktayken pişirme işlemi sonlandırılmaktadır.

Günümüzde, teknolojinin gelişmesiyle birlikte, Türk kahvesini otomatik olarak pişirebilen makineler ortaya çıkarılmaktadır. Piyasada önemli bir yere sahip olan bu ürünlerin başarısında

en etkili olan parametre pişirme işleminin doğru zamanda sonlandırılabilmesidir. Doğru zamanda tamamlanamayan pişirmelerin sonucunda kahve çığ, köpüksüz veya yanık olabilmektedir. Bu nedenle pişirme işleminin kontrolünü sağlamada algılayıcı sistemler kritik bir öneme sahiptirler.

Hali hazırda geliştirilmiş olan Türk kahvesi makinelerinde çeşitli algılayıcı sistemler kullanılmakta olup, bu makineler genellikle sürdürülebilir bir performans sunmakta problemler yaşamaktadırlar. Birçok üründe pişirici hazne içerisinde kahveye temas eden bir sıcaklık algılayıcısı ile kahve sıcaklığı doğrudan ölçülmektedir. Bu yöntem, kahvenin pişme durumunu iyi bir şekilde kontrol etse de kullanıcıya hoş görünmeyen, temizlemesi zor, kalite algısı düşük bir çözüm sunmaktadır [3]. Kahve ile doğrudan temas etmeyen ve kahve pişerken çıkan buharın sıcaklığını ölçerek kahvenin piştiğine karar veren algılayıcı sistem ise ortam sıcaklığından ve ortamdaki hava akımından olumsuz etkilenebilmektedir [4]. Pişme işlemi sırasında kahvenin yavaşça kabarmasını bir avantaj olarak kullanan farklı bir yöntemde optik algılayıcılar ile kahvenin köpük seviyesinin yükselişi algılanmaktadır [5]. Bu yöntemde ise algılayıcıyı etkileyebilecek sıcaklık, buhar, çevresel ışık kaynakları ve algılayıcı üzerinde yoğunlaşma gerçekleşmesi gibi etkiler kahvenin piştiği kararı verilmesinde hatalara neden olabilmektedir.

Otomatik pişirici cihazlardaki ısı iletimi kaynaktan itibaren ele alındığında, pişirilen heterojen sıvı için iletimin gerçekleştiği tüm noktalarda zaman gecikmesi problemi ortaya çıkmaktadır. Pişirici bir cihazda kap ve içindeki heterojen karışımın sıcaklığının temassız olarak algılanmasına ve kontrol edilmesine yönelik daha önce yapılan bir çalışmada pişirici kabın yerleştirildiği cam plakanın altına NTC algılayıcı yerleştirilmiştir [6]. Sistemdeki ısı transferi durum-uzay modeli oluşturularak uyarlamalı bir kontrol yapısı ile karışım sıcaklığı kontrol edilmiştir. Kap ile ısıtıcı arasında bulunan cam plakanın termal iletim sürecinde meydana getirdiği zaman gecikmeleri nedeniyle kızartma gibi yüksek yüklü uygulamalarda beklenen sonuç alınamamıştır. Benzer bir çalışmada Kalman filtresi kullanılarak zaman gecikmelerinin yarattığı belirsizliklerle başa çıkılmaya çalışılmıştır [7]. Başka bir çalışmada cam plakanın yarattığı zaman gecikmesinin önüne geçilmesi için pişirici kap sıcaklığı kabın yan tarafına yerleştirilen bir optik sıcaklık algılayıcısı ile ölçülmüştür [8]. Bu yöntem kullanılarak karışım sıcaklığını kontrol edebilecek gözleyici tabanlı kontrolörler tasarlanmıştır [9]. Optik sıcaklık algılayıcısının cam plaka altına yerleştirilerek pişirici kabın taban sıcaklığının ölçüldüğü çalışmalar da mevcuttur [10].

Kullanılan enerjinin %90'a kadarının gıdaya aktarılabilirdiği induksiyonlu pişirme yöntemi [11], en verimli pişirme teknolojilerinden biri olarak kabul edilmektedir. İndüksiyonlu ısıtma sistemlerinde bulunan bobin üzerine AC akım uygulandığında etrafında bir manyetik alan oluşturmaktadır [12]. Bu manyetik alana başka bir iletken nesne girdiğinde manyetik hareketin hızı değişmekte ve nesne yüzeyinde bobin akımının tersi yönünde girdap akımları meydana getirerek nesnenin ısınmasını sağlamaktadır.

İndüksiyonlu Türk kahvesi makinesinde, pişirme işlemi sırasında bobinin oluşturduğu manyetik alan cezve tabanında daha yoğun olduğu için daha fazla, cezvenin yan duvarlarında ise daha zayıf olduğu için daha az ısıya neden olmaktadır. Ayrıca ısı yayılımından kaynaklı olarak, kahve sıcaklığını tam olarak ölçebilmek mümkün olamamaktadır. Diğer taraftan, cezvenin içerisinde yerleştirilecek her bir sıcaklık algılayıcısı daha önceden bahsedilen istenmeyen etkilere yol açmaktadır.

Buradan hareketle, bu çalışmada, Türk kahvesi makinelerinde yaşanan pişirme algılama problemlerine alternatif bir çözüm yöntemi olarak, pişirici haznenin dışına yerleştirilen sıcaklık algılayıcısı yardımıyla karışımın sıcaklığını temassız bir şekilde kestirebilen bir algılayıcı sistem modeli sunulmaktadır. Hem modelin oluşturulması hem de test edilmesi amacı ile induksiyon ısıtma yöntemiyle pişirme yapan bir Türk kahvesi makinesi kullanılan bir deney düzeneği hazırlanmıştır. Bu düzeneğin yardımı ile elde edilen gerçek veriler ile bir algılayıcı sistem modeli oluşturulmuş ve bu model farklı çalışma koşulları için sınanarak sonuçlar ortaya konulmuştur. Bu sonuçlara göre önerilen algılama yöntemi ile istenilen tat ve kıvama sahip Türk kahveleri pişirmenin mümkün olduğu ortaya çıkmaktadır.

2. Test Düzeneği

Bu çalışma kapsamında sistem tanıma ve test amacı ile bir deney düzeneği oluşturulmuştur. Bu deney düzeneğinde kullanılan kahve makinesi, hali hazırda ticari bir ürün olarak piyasada bulunabilen bir Türk kahvesi makinesinin üzerinde bir miktar değişiklik yapılarak oluşturulmuştur. Bu amaçla

1. Algılayıcı sistem tasarımı,
2. Veri toplama ve kaydetme

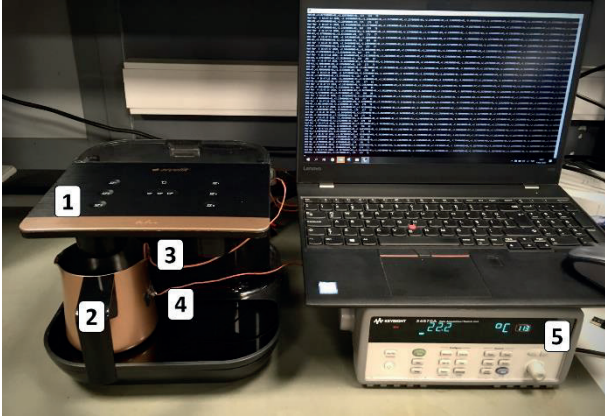
işlemleri gerçekleştirilmiştir.

Çalışmanın temel amacı olan hazne dışarısına yerleştirilmiş bir sıcaklık algılayıcısı ile kahve pişirme işleminin sağlanmasına yönelik olarak, makinede kullanılan haznenin içerisine ve dışarısına birer sıcaklık algılayıcısı eklenmiştir. Böylece, ısıtma bobini akımı da kullanılarak, cezvenin iç ve dış sıcaklıkları arasındaki ilişkinin ortaya konulup, fiziksel sistemin dinamik modelinin oluşturulması hedeflenmiştir.

Sisteme eklenen sıcaklık algılayıcıları, biri referans olmak üzere iki nesne arasındaki sıcaklık farkının oluşturduğu gerilim farkının ölçülmesini sağlayan T-tipi ısı çift algılayıcılar olarak belirlenmiştir [13]. Bu tercihte, T-tipi ısı çiftlerin bu uygulama için istenen sıcaklık aralığında iyi sonuçlar vermesi, ucuz maliyete sahip oluşu ve gıda sıcaklığı ölçümlerinde yaygın olarak kullanılması etkili olmuştur [14].

Diğer taraftan, algılayıcı verilerinin gerçek zamanlı olarak kayıt altına alınması amacı ile RS232 protokolüne sahip Keysight 34970A veri toplama cihazı ve bir bilgisayar deney düzeneğine bağlanmıştır. Şekil 1 ile gösterilmiş olan deney düzeneğinde; induksiyonlu kahve makinesi (1), cezvesi (2), kahve sıcaklığını ölçen ısı çifti (3), cezvenin dış yüzeyini ölçen ısı çifti (4) ve bu ısı çiftlerinin bağlandığı veri toplama cihazı (5) görülmektedir. Kullanılan veri toplama cihazında ısı çifti referans kalibrasyonu özelliği vardır ve Keysight 34901A modülü kullanılarak ısı çiftlerinden sıcaklık verisi elde edilmiştir.

Test amacı ile kullanılan induksiyonlu Türk kahvesi makinesi, pişirme işlemi sırasında nominal olarak 500W gücü cezveye aktaracak şekilde programlanmıştır. Cezveye aktarılan güç miktarı, induksiyonlu pişirme sistemlerindeki yüksek verimlilikten dolayı bobin akımı ile ilişkilendirilebilmektedir. Sıcaklık algılayıcısı verilerine ek olarak, kahve makinesinin donanımındaki yapı ile bobin akımı ölçülerek elde edilen değerler makinenin haberleşme protokolü aracılığıyla bilgisayar ortamına aktarılmaktadır.

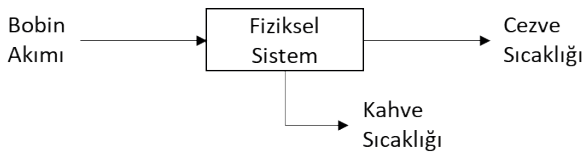


Şekil 1: Deney düzeneği.

3. Yöntem

Özellikle heterojen sıvıların pişirilmesi için üretilmiş olan otomatik pişirme cihazlarının tasarımı aşamasında beliren sorunlardan bir tanesi sıvı sıcaklığının gerçek zamanlı olarak ölçülebilmesi olarak karşımıza çıkmaktadır. Sıvı sıcaklığını olabildiğince doğru şekilde ölçebilmek için ise pişirme haznesinin içerisine sıcaklık algılayıcı(lar) yerleştirilebilmektedir. Bu yöntem, hijyen, kötü görüntü, kalite algısının düşük olması gibi bir takım problemleri de beraberinde getirmektedir. Bu çalışmada bu dezavantajları ortadan kaldırmak üzere, hazne dışına yerleştirilen bir sıcaklık algılayıcısı ile pişirme işleminin kontrol edilmesi bir yöntem olarak ortaya konulmaktadır. Bu amaçla tüm sistemin modelini elde etmek üzere, kahve sıcaklığı, cezve sıcaklığı ve bobin akımı verileri kullanılarak MATLAB Sistem Tanıma Aracı kullanılmıştır [15]. Bunun sonrasında, kahve sıcaklığının gerçek zamanlı kestirimi için gözleyici benzeri bir yapı geliştirilmiştir.

İndüksiyonla ısıtma işleminde, ısıtıcı bobinin alternatif akım ile sürülmesiyle birlikte cezveye ısı iletimi başlamakta, ve böylece cezve tabanının sıcaklığı artmaktadır. Bu durumu ısı transferi ile kahve ve cezvenin yan duvarlarını da sıcaklığının artması takip etmektedir. Bu fiziksel sistem Şekil 2'deki gibi girişi bobin akımı, çıkışı ise cezve sıcaklığı olacak şekilde ifade edilebilmektedir. Bu noktada dikkat edilmesi gereken husus, pişirme işleminin kontrolü için gerekli olan kahve sıcaklığının ölçülemeyen bir sistem değişkeni olmasıdır.



Şekil 2: Fiziksel sistem blok diyagramı.

Kahve sıcaklığının kestirilmesini sağlayacak sistem modelini oluşturmak üzere, kahve pişirme deneyleri yapılarak cezvenin iç ve dış sıcaklıkları ile bobin akımı verileri toplanmıştır. Bu deneyler, iki kişilik porsiyonu oluşturan yaklaşık 14 gram Türk kahvesi ve 20°C sıcaklıktaki 150 mL su kullanılarak 25°C sıcaklıktaki oda koşullarında, cezveye 500W güç uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Sistem modeli, toplanan bu

verilerin MATLAB Sistem Tanıma Araç Kutusu komutları ile kullanılması sonucunda oluşturulmuştur.

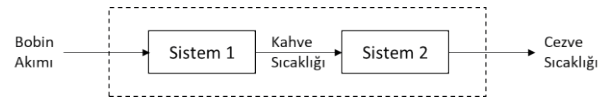
Sistem tanıma aşaması; deneysel planlama, veri toplama, modellerin kurulması, deney verilerinden bilinmeyen sistem parametrelerinin elde edilmesini ve bulunan modelin geçerliliğinin test edilmesi süreçlerini içermektedir. Pişirme deneylerinin ardından fiziksel sistemin modeli, birbirine bağlı iki alt sistemden oluşacak şekilde tasarlanmıştır. Bu alt sistemler zamanla değişmeyen ve ayrık yapıdaki durum-uzay modelleri olarak ifade edilmektedir. Sistem Tanıma Araç Kutusu ile deneylerde ölçülen giriş ve çıkış verilerinden, sistem modeline ait alt sistemler için sistem parametreleri oluşturulmuştur. Bu parametreler, gerçek kahve sıcaklığı değerleri ile en iyi uyum oranına sahip olan modelin parametreleri olarak belirlenmiştir. Girişi bobin akımı ve çıkışı kahve sıcaklığı olan bir sistem modeline ek olarak, girişi kahve sıcaklığı ve çıkışı cezve sıcaklığı olan ikinci bir sistem modeli oluşturulmuştur. Bu iki alt sistem, kontrol sistemini seri bağlı bir şekilde Şekil 3'te gösterildiği gibi matematiksel olarak ifade etmektedir.

Cezve tabanındaki yoğun indüklenme ilk olarak taban sıcaklığının artmasını sağlamaktadır. Isı kaynağı haline gelen cezve tabanı, cezve içinde taban ile temas etmekte olan kahve ve su karışımının sıcaklığının ısı transferi yoluyla yükselmesine neden olmaktadır. Cezvenin yan duvarları ise indüklenmeden minimum düzeyde etkilenecek, cezve içinde ısınan karışım ile bir ısı alışverişine girerek sıcaklığı yükselmeye başlamaktadır. Bu durum, cezve için uygulanan sonlu elemanlar yöntemi ve termal kamera görüntüsü ile Şekil 4'te gösterilmektedir.

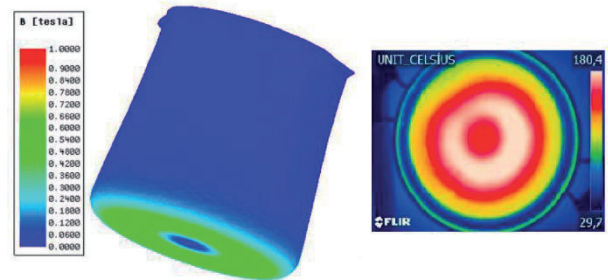
Sistemin matematiksel modeli bu fiziksel bağıntıya göre kurgulanmıştır. Bu noktada dikkat edilmesi gereken bir husus ölçülebilen nicelik olan cezve sıcaklığının çıkış olarak kullanılmasıdır. Burada her bir alt sistem modeli ayrık zamanlı ve zamanla değişmeyen yapıda ele alınmıştır. Dolayısı ile bu alt sistemlere ilişkin dinamik modellerin genel gösterimleri (1) ve (2) ile verilmektedir.

$$x_n(k+1) = A_n x_n(k) + B_n u_n(k) \quad (1)$$

$$y_n(k) = C_n x_n(k) + D_n u_n(k) \quad (2)$$



Şekil 3: Kontrol sistemine ait genel blok diyagramı.



Şekil 4: Cezvenin termal analizi.

Burada $n = 1,2$ olmak üzere sistem indisini, x_n durum vektörlerini, A_n , B_n , C_n ve D_n sırası ile sistem, kontrol, çıkış

ve ileri besleme matrislerini, k ise ayrık zaman değişkenini temsil etmektedir.

Gerçek zamanlı olarak toplanmış verilerin kullanılması elde edilen sistem, kontrol, çıkış ve ileri besleme matrislerine ilişkin değerler ise, ilk alt sistem için

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0.9919 & -0.0231 \\ -0.0265 & 0.9163 \end{bmatrix},$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} 0.0025 \\ 0.0090 \end{bmatrix},$$

$$C_1 = [-5.8095 \quad 6.9414],$$

$$D_1 = 0$$

olarak, ikinci alt sistem için ise

$$A_2 = \begin{bmatrix} 0.9951 & -0.0050 & 0.0043 \\ -0.0652 & 0.8963 & -0.0272 \\ 0.1445 & 0.2870 & 0.5094 \end{bmatrix},$$

$$B_2 = \begin{bmatrix} -0.0146 \\ 0.2724 \\ 2.0371 \end{bmatrix},$$

$$C_2 = [-22.7480 \quad 0.0088 \quad -0.0266],$$

$$D_2 = 0$$

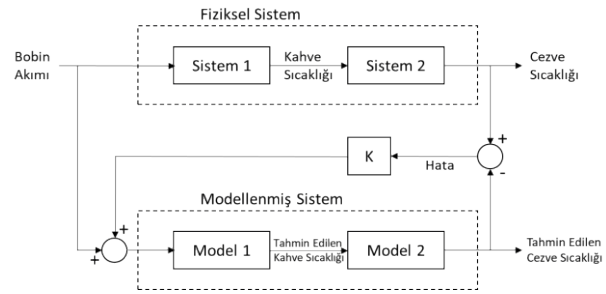
biçiminde sunulmaktadır.

Kontrol sistemleri tasarlanırken, birçok karmaşık sistemde olduğu gibi sistemin iç durum vektörü her zaman ölçüm yoluyla elde edilememektedir. Bu çalışmada kontrol edilmeye çalışılan nicelik de, sistem yapısı itibarı ile doğrudan ölçülememektedir. Kontrol sisteminde kullanılmak üzere, induksiyon ısıtıcılı Türk kahvesi makinesinde pişirme işlemi sırasında kahve sıcaklığının hazne içerisine yerleştirilmiş bir algılayıcı ile kestirmek yerine, cezvenin dış yan duvarına yerleştirilen bir sıcaklık algılayıcısı ile kestirilmesi amaçlanmıştır. Böylelikle, hazne içerisine yerleştirilecek algılayıcının getireceği dezavantajlardan etkilenilmeyecektir.

İndüksiyonlu ısıtmanın sağladığı yüksek enerji verimine ve cezvenin ince yapısına rağmen kahve ve cezve arasındaki ısı iletimi sırasında zaman gecikmeleri yaşanmaktadır. Kullanılan suyun miktarı, sıcaklığı ve ısıtıcı gücü değişimleri gibi etkenler ile ısı iletim karakteristiğinin değişmesine bağlı olarak cezve üzerinde birim zamanda farklı miktarlarda sıcaklık değişimini meydana getirmektedir. Ortaya çıkan model hatasını düzeltmek ve kahve sıcaklığı kestirimini iyileştirmek için cezve sıcaklığını algılayıcı ile ölçerek yapılan hatayı geri besleme ile düzelten bir gözleyici sistem tasarlanmıştır [16].

Gerçek sistemin ölçülemeyen iç sistem durumu olan kahve sıcaklığı bilgisi, sistem tanıma yöntemi ile oluşturulan modelin baz alındığı durum gözleyici yapısı ile elde edilmektedir. Bu yapıya ilişkin blok diyagramı Şekil 5 ile sunulmaktadır. Buna göre sistemin ölçülebilen bir parametresi olan gerçek cezve sıcaklığı ile cezve sıcaklığı kestiriminin farkı alınarak gözleyici hatası belirlenmektedir. Bu hata gözleyici kazancı olarak belirlenen K sabiti ile çarpılarak gözlenen değer sisteme geri beslenmektedir. Böylece gerçek cezve sıcaklığı ile kestirilen cezve sıcaklığı arasındaki fark indirgenerek gerçek kahve sıcaklığı değerine daha yakın bir kahve sıcaklığı tahmini elde edilmektedir.

Gözleyici kazancının en iyi değeri, sistem için belirlenmiş sınır koşullar içinde yapılmış doğrulayıcı deneylerde en küçük kareler yöntemi kullanılarak en küçük kestirim hatasını sağlayacak şekilde belirlenmiştir [17]. En küçük kareler yöntemi yardımıyla, gözleyici kazancı K için 2.9 değeri hesaplanmış ve yapılan doğrulama deneylerinde bu değer kullanılmıştır.



Şekil 5: Kahve sıcaklığı kestirimi için oluşturulan gözleyici yapısı.

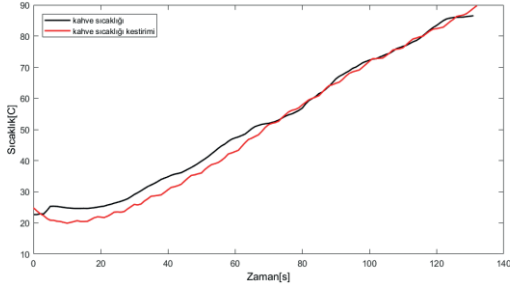
4. Bulgular ve Tartışma

Sistem tanıma yolu ile elde edilen modelin doğrulanması için, deneysel çalışmalar ile elde edilen sonuçlar ile karşılaştırmak üzere benzetim çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında yapılan deneylerde, pişirme işlemi süresince sıcaklık değerleri hem cezvenin içinden hem de cezvenin dışından elde edilmiştir. Ayrıca bu sıcaklık değerlerine karşılık gelen induksiyon bobini akımı değerleri de kaydedilmiştir. Bu veriler, sistem tanıma yöntemi ile sistemin matematiksel modelinin oluşturulması yanı sıra, algılayıcı sistem modelinin doğruluğunun testleri için de kullanılmıştır. Doğrulama testleri için daha önceden kaydedilmiş olan veri setleri MATLAB Simulink ortamında oluşturulmuş ve algılayıcı sistem modelinin benzetimi gerçekleştirilerek karışım sıcaklığı için kestirilen değerler elde edilmiştir.

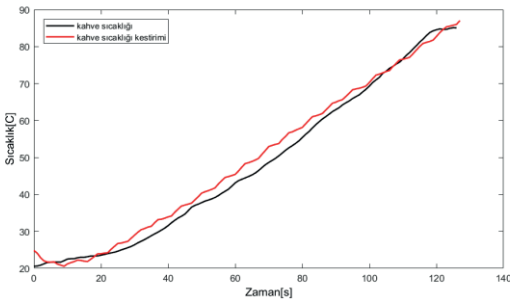
Çalışmada kullanılan Türk kahvesi makinesi 500W gücü cezveye aktaracak şekilde programlanarak sistem modeli elde edilmiştir. Diğer taraftan, oluşturulan algılayıcı sistem modelinin test edilmesi için Türk kahvesi makinesinin cezveye aktardığı güç 480W ve 520W olacak şekilde programlanarak farklı giriş sinyallerinin etkisi de gözlemlenmiştir. Deneylerde 20°C başlangıç sıcaklığına sahip su kullanılmıştır. Kahve ve su karışımı miktarı iki kişilik porsiyon olarak ayarlanmıştır.

Gerçek zamanlı çalışma esnasında elde edilen kahve sıcaklığı kestirimi değerleri cezvenin içinden ölçülmüş olan gerçek kahve sıcaklığı verileri ile kıyaslanmıştır. Ayrıca, algılayıcı sistemin performansı ve hata miktarını ölçmek üzere çalışma süresince her bir zaman örnekleme noktasına denk gelen gerçek kahve sıcaklığı ile kestirilen kahve sıcaklığı değerlerinin farkının mutlak değeri alınmıştır.

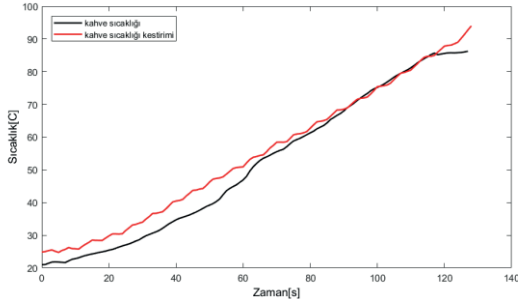
Şekil 6, Şekil 7 ve Şekil 8 ile, sırasıyla 480W, 500W ve 520W güç ile yapılan pişirme işlemine ilişkin kahve sıcaklığı kestirimi ve gerçek kahve sıcaklığı değerleri sunulmaktadır.



Şekil 6: 480W güç ile yapılan deney için gerçek kahve sıcaklığı ve kahve sıcaklığı kestirimi değişimleri.



Şekil 7: 500W güç ile yapılan deney için gerçek kahve sıcaklığı ve kahve sıcaklığı kestirimi değişimleri.



Şekil 8: 520W güç ile yapılan deney için gerçek kahve sıcaklığı ve kahve sıcaklığı kestirimi değişimleri.

Sergilenen sonuçlarda görüldüğü üzere, başlangıçta kestirim hatası oldukça fazladır. Sıcaklık arttıkça kestirim değerleri gerçek değerlere yakınsamaktadır. Türk kahvesi kaynama sıcaklığına ulaştığında artık sıcaklığı hemen hemen sabit kalarak kabarma fazına geçmektedir. Ancak ısı transferinden dolayı cezve sıcaklığı yükselmeye devam etmektedir. Farklı giriş güçleri ile elde edilen deney sonuçlarına göre, önerilen gözleyici yapısı ile kahve sıcaklığının özellikle istenilen aralıkta başarı ile gözlenebildiği görülmektedir. Fakat, heterojen sıvının yapısı ve yoğunluğunun değişmesi durumunda ısı iletimindeki zaman gecikmesinin olumsuz etkilerinin ortaya çıkacağı düşünülmektedir.

Tasarlanan sistem modelinin doğrusal olması ve kabarma anında kahve ile cezvenin aynı karakteristiği göstermemesi nedeniyle 85°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda bir miktar kestirim hatası meydana gelmektedir. Fakat kahvenin pişirilmesinin durdurulacağı sıcaklıklarda (85°C-90°C) kestirim hatasının oldukça düşük olduğu gözlenmektedir.

25°C - 90°C ve 70°C - 90°C sıcaklık aralıkları için deney sonuçlarında elde edilen genlik olarak en büyük hata ve ortalama hata değerleri Tablo 1 ve Tablo 2 ile sunulmaktadır. Bu değerler incelendiğinde de oluşan hataların özellikle başlangıçta büyük değerler aldığı, istenilen aralıkta ise çok daha iyi sonuçlar elde edildiği görülebilmektedir. Sonuç olarak, cezve dışına yerleştirilecek sadece bir adet sıcaklık algılayıcısı ile Türk kahvesi pişirme işleminin başarı ile kontrol edilebileceğini göstermektedir. Ayrıca, tüm çalışma aralığı için ortalama hata değeri çalışma aralığına oranlanıp başarı değeri olarak düşünülebilecek %96.63 değeri elde edilmiştir.

Tablo 1: Deney sonuçlarına göre 25°C -90°C aralığında genlik olarak hatanın ortalama ve en büyük değerleri

Güç (W)	Ortalama hata (°C)	En büyük hata (°C)
480	2.23	4.94
500	2.10	6.75
520	3.09	7.47

Tablo 2: Deney sonuçlarına göre 70°C - 90°C aralığında genlik olarak hatanın ortalama ve en büyük değerleri

Güç (W)	Ortalama hata (°C)	En büyük hata (°C)
480	0.73	2.09
500	1.66	5.77
520	1.05	5.39

5. Sonuçlar

Bu çalışmada, bir Türk kahvesi makinesi için algılayıcı seçimi ve yerleşimi problemi ele alınmış, sistem tanıma ve durum gözleyici ile kahve sıcaklığı kestirilerek kontrol algoritmasında kullanılmak üzere hazır hale getirilmiştir. Elde edilen bulgular ışığında, sıcaklık algılayıcısı yardımıyla pişirici kap içindeki karışımın sıcaklığının temassız bir şekilde durum kestirimi ile tahmin edilebileceği sonucu çıkarılabilmektedir.

Gerçekleştirilen deneysel çalışmaların sonuçlarına göre, özellikle pişmeye yakın sıcaklıklar için, önerilen yapı ile oldukça iyi sonuçlar elde edilmiştir. Nominal güç ile yapılan pişirme testlerinde 25°C ve 90°C sıcaklıkları arasında gerçek karışımın sıcaklığı %96.63 başarı oranı ile kestirilmektedir. Ayrıca, geliştirilen algılayıcı sistem modeli, tüm pişirme işlemi süresince karışım sıcaklığını kestirebilmektedir. Böylece kahvenin sadece kabarma anındaki fiziksel değişimini algılayarak pişme kararı veren algılayıcı sistemlerin aksine pişirme işleminin başlangıcından sonuna kadar olan sürecin durumu hakkında bilgi edinilebilmektedir. Dolayısı ile önerilen yöntem daha geniş aralıklarda sıcaklık bilgisi gerektiren uygulamalarda da kullanılabilir.

Gerçekleştirilen pişirme deneylerinde 20°C sıcaklıkta su kullanılmış ve model bu değere göre oluşturulmuştur. Farklı su sıcaklıkları kullanılması durumunda pişme süreleri ısı geçiş karakteristiğinin değişmesine bağlı olarak farklı zaman gecikmelerine neden olacak ve bu da sistem modelinin hatasının artmasına neden olabilecektir. Bu durum, farklı sıcaklıklardaki su için pişirme deneylerinin ve sistem tanıma aşamasının tekrarlanarak, zaman gecikmesini de içerecek şekilde model veya modeller oluşturulmasını gerektirmektedir. Koşullara en uygun olan modelin seçildiği uyarlamalı bir yapı

kullanılarak sıcaklık kestiriminin en az hata ile gerçekleştirilmesi mümkündür. Benzer şekilde karışım miktarındaki kütleli değişimler de karışım ile cezve arasındaki ısı transferinde yaşanan zaman gecikmelerini değiştireceğinden uyarlamalı bir yapı kurulması avantaj sağlayabilecektir. Bu çalışmada başarılı sonuçlar elde edilmiş olsa da, heterojen sıvı pişirme problemi genel olarak ele alındığında sistem modelinde zaman gecikmesi etkisinin de bulunması sonuçları iyileştirecektir.

Önerilen yöntem, pişirici kap üzerine yerleştirilebilecek farklı türlerdeki sıcaklık algılayıcısı kullanımına uygundur. Isıl çiftlerin kablolarının pratik kullanımda yaratacağı olumsuz etkileri, pişirici kap ile pişirici makinenin gövdesi arasında kablosuz bir iletişim sağlayan devre tasarımı ya da gövde üzerine yerleştirilmiş uzaktan sıcaklık ölçebilen optik sıcaklık algılayıcılarının tercih edilmesi ile ortadan kaldırmak mümkündür. Sistem tanıma yöntemi ile oluşturulan algılayıcı sistem modeli, indüksiyon ısıtıcılı pişirici makinelerde pratikliği, ucuz maliyeti ve düşük hata ortalamasıyla sıcaklık kontrolü sağlaması gibi avantajları ile kolayca uygulanabilecek bir yöntemdir.

Kaynakça

- [1] Yılmaz, B.Ş., Acar-Tek, N., & Sözlü, S., Turkish cultural heritage: a cup of coffee, 2017.
- [2] Özgür N., “Türk Kahvesi Standartları ve Pişirme Ekipmanları Teknik Analizi”, Türk Kahvesi Kültürü ve Araştırmaları Derneği, 2012.
- [3] Midoğlu H., Konuk A. ve Esmek K., A Turkish coffee machine and a Turkish coffee brewing method, WO2011002421A2, 2011.
- [4] Atilla E., A Turkish coffee machine, WO2015102553A1, 2015.
- [5] Çalık R., Yüzer O., Başaran U., Dönerkayalı A., Özyurt B. ve Kantaş M., A coffee machine, WO2019192778A1, 2019.
- [6] Paesa, D., Llorente, S., Sagues, C., & Aldana, O.J., Adaptive Observers Applied to Pan Temperature Control of Induction Hobs. IEEE Transactions on Industry Applications, 45, 1116-1125, 2009.
- [7] D'Antona, G., Santacatterina, G., SeifNaraghi, N., & Brindani, F., Water temperature estimation in induction cooker for higher energy efficiency. 2014 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC) Proceedings, 525-529, 2014.
- [8] Has, U., & Wassilew, D., Temperature control for food in pots on cooking hobs. IEEE Trans. Industrial Electronics, 46, 1030-1034, 1999.
- [9] Paesa, D., Franco, C., Llorente, S., López-Nicolás, G., & Sagues, C., Adaptive Simmering Control for Domestic Induction Cookers. IEEE Transactions on Industry Applications, 47, 2257-2267, 2011.
- [10] Lasobras, J., Alonso, R., Carretero, C., Carretero, E., & Imaz, E., Infrared Sensor-Based Temperature Control for Domestic Induction Cooktops. Sensors, 2009.
- [11] Sweeney, M., Dols, J., Fortenbery, B., & Sharp, F., Induction Cooking Technology Design and Assessment, 2014.
- [12] AN9012 Induction Heating System Topology Review, 2000.
- [13] Labfacility Ltd., Temperature Handbook, 2006.
- [14] Pyromation, Inc., Thermocouple theory, 2009.
- [15] Ljung, L., System Identification Toolbox-User's Guide The MathWorks, 2000.
- [16] Luenberger, D.G., An introduction to observers, 1971.
- [17] Miller, S. J., The method of least squares. Mathematics Department Brown University, 114, 2006.

Arda DÖNERKAYALI



Arda Dönerkayalı, 1992 yılında İstanbul'da doğmuştur. Kadıköy Anadolu Lisesi'nden 2011 yılında mezun olduktan sonra Yıldız Teknik Üniversitesi Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği bölümünde lisans eğitimini 2017 yılında tamamlamıştır ve aynı bölümde yüksek lisans eğitimini sürdürmektedir. 2017 yılından bu yana Arçelik A.Ş. Ar-Ge Direktörlüğü Sensör Teknolojileri bölümünde çalışmaktadır. Algılama teknolojileri, beyaz eşya ve küçük ev aletleri ile bu ürünlerde algılama ve kontrol yöntemleri uzmanlık alanları arasında bulunmaktadır. Ayrıca doğa fotoğrafçılığı, kuş gözlemciliği ve biyoçeşitlilik araştırmaları ilgi alanları olup bu konularda kitap çalışmaları yapmaktadır.

Türker TÜRKER



Türker Türker, 1981 yılında Tekirdağ Saray'da doğmuştur. Lisans, Yüksek Lisans ve Doktora eğitimlerini sırası ile 2002, 2005 ve 2010 senelerinde Yıldız Teknik Üniversitesi Elektrik Mühendisliği Bölümünde tamamlamıştır. Doktora sonrasında 2011-2012 yıllarında bir sene süre ile Ecoledes Mines de Paris Üniversitesi'nde doktora sonrası çalışmalarda bulunmuştur. 2013 yılından bu yana Yıldız Teknik Üniversitesi Elektrik Elektronik Fakültesi Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Bölümünde Öğretim Üyesi olarak görev yapmaktadır. Kontrol edilen doğrusal olmayan sistemler, elektromekanik sistemlerin kontrolü ve ayrık-zamanlı kontrol sistemleri ilgi alanları arasında yer almaktadır.

Bir Fazlı Şebeke Etkileşimli Eviricide LCL Filtre Parametre Değerlerinin ve Seri Sönümleme Direnç Değerinin Değişim Etkisi

Change Effect of LCL Filter Parameter Values and Series Damping Resistor Value in Single Phase Grid Connected Inverter

Akif Karafil 

¹Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi
Yalova Üniversitesi, Yalova, Türkiye
akif.karafil@yalova.edu.tr

Öz

Bu çalışmada bir fazlı şebeke etkileşimli eviricinin LCL filtre parametreleri hesap edilmiştir. Hesap edilen LCL filtre parametrelerinin ve seri sönümleme direncinin %50 artması ve azalması durumunda şebeke akımının toplam harmonik bozulma (THD) ve kayıp güç değerlerinin değişimi analiz edilerek en uygun değerler belirlenmiştir. Analiz çalışmaları PSIM benzetim programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çalışma 1 kW gücünde olup akım kontrolünde oransal rezonans (PR) kontrol, PLL algoritmasında ise T/4 gecikmeli PLL yapısı kullanılmıştır. Analiz sonuçlarına göre bobin değerlerinin artırılması akımın THD değerini ve kayıp güç miktarını düşürdüğü belirlenmiştir. Sönümleme direnç değerinin düşürülmesi de yine THD ve kayıp güç değerlerini düşürmektedir. LCL filtre tasarımında bobin değerlerinin artırılması, seri sönümleme direnç değerinin ise düşürülmesinin uygun olacağı görülmüştür. Anahtar kelimeler: LCL filtre, bir fazlı şebeke etkileşimli evirici, PR akım kontrolü.

Abstract

In this study, LCL filter parameters of a single phase grid connected inverter were calculated. The change of total harmonic distortion (THD) of the grid current and power loss values when the calculated LCL filter parameters and series damping resistor were increased and decreased by 50% was analyzed and the most appropriate values were determined. Analysis studies were carried out using the PSIM simulation program. The study had a power of 1 kW and proportional resonant (PR) control was used in current control and T/4 delay PLL structure was used in PLL algorithm. According to the results of the analysis, it was determined that increasing the inductor values decreased the THD value of the current and the amount of power loss. In addition, decreasing the damping resistor value also decreased THD and power loss values. In LCL filter design, it was seen that it would be appropriate to increase the inductor values and to decrease the series damping resistor value. Keywords: LCL filter, single phase grid connected inverter, PR current control.

1. Giriş

Günümüzde elektrik enerjisi üretiminde ana kaynak olarak kullanılan fosil yakıtların azalması ve yakın zamanda tükeneyeceğinin bilinmesi, çevre kirliliğine neden olmaları ve ekosisteme vermiş oldukları zararlar nedeniyle yeni enerji kaynaklarına yönelik araştırmalar önem kazanmıştır. Dünyanın artan enerji ihtiyacının temiz, ekonomik ve güvenli bir biçimde karşılanabilmesi için biyokütle, jeotermal, rüzgâr ve güneş gibi yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgi giderek artmıştır [1, 2]. Yükü besleyen şebeke bağlantılı yenilenebilir enerji sistemlerinde üretilen enerji miktarının tüketilen enerji miktarından fazla olduğu durumlarda fazla olan enerji sistemde yer alan çift yönlü sayaç ile ölçülerek şebekeye aktarılır. Bu durum yenilenebilir enerji sistemlerinin amorti sürelerini kısaltmaktadır. Aynı zamanda yenilenebilir enerji sistemlerinin yetersiz kaldığı veya enerjinin sağlanamadığı durumlarda yüklerin ihtiyaç duyduğu enerji şebekeden sağlanır [3-5].

Şebeke etkileşimli eviriciler, devre girişine uygulanan doğru gerilimi anahtarlama devresi ile anahtarlama yaparak alternatif gerilime çevirmekle birlikte şebeke geriliminin frekansı ve genliği ile senkronize olarak çalışmaktadır. Bir şebeke etkileşimli eviriciden beklenen en önemli özellik şebekeye aktaracağı akımın saf sinüs şeklinde olması ve akım harmoniklerinin yönetmeliklerde belirtilen sınırlar dâhilinde olmasıdır. IEEE1547 ve IEC61727 gibi uluslararası standartlarda, akımın maksimum toplam harmonik bozulma (THD) değerinin %5'i geçmemesi gerektiği belirtilmiştir [6, 7]. Bu yüzden istenilen THD değerinin elde edilebilmesi için anahtarlama devresinin çıkışında bir filtre kullanılması gerekir. Evirici filtre tipleri; L filtre, LC filtre, LCL filtre ve LLCL filtre olmak üzere dörde ayrılır. L ve LC tipi filtrelerle kıyaslandığında LCL tipi filtrelerde boyut daha küçük ve maliyet daha düşüktür. Ayrıca bu filtre tipi ile şebekeye aktarılan akımın sinüs formunda olması sağlanarak istenilen THD değeri elde edilebilir. LCL tipi filtrenin LLCL tipi filtreye kıyasla en önemli avantajı ise sistemin kararlı hal durumunda kalabilmesidir. Bütün bu avantajları nedeniyle LCL tipi filtre şebeke etkileşimli evirici tasarımlarında sıklıkla kullanılan bir filtre tipidir [8-10].

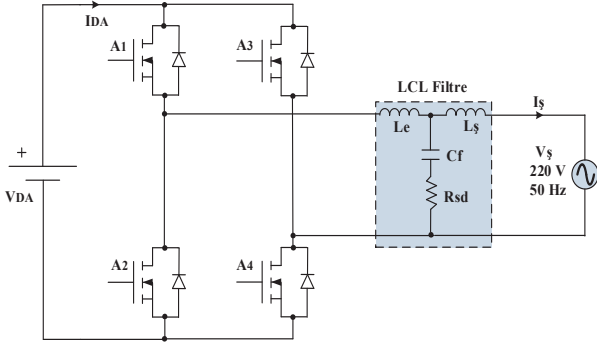
Şebeke etkileşimli eviricilerde şebekeye aktarılan akımın dalga şekli ve fazı önemli olduğu için kontrol yöntemi olarak

genellikle akım kontrolü kullanılır. Akım kontrolünde en çok kullanılan denetleyiciler arasında lineer denetleyiciler bulunmaktadır. Lineer denetleyicilerin dinamik tepkileri iyi olup sistem içerisinde bir zaman geciktirmesi oluşturmazlar. Bu denetleyiciler arasında yer alan oransal rezonans (PR) denetleyici ise sıfır kararlı durum hatasının kontrol ünitesinin dinamiklerini etkilemeden elde edilebilmesi amacıyla şebeke etkileşimli eviricilerin akım kontrolünde en sık tercih edilen denetleyicilerden biridir [11-13].

Bu çalışmada, 1 kW gücünde PR akım kontrollü bir fazlı şebeke etkileşimli eviricinin LCL filtre parametre değerleri ve seri sönümlenme direnç değeri hesaplanmıştır. Hesaplanan LCL filtre parametre ve sönümlenme direnç değerlerinin \pm %50 değişmesi durumunda sistemde meydana gelen değişiklikler PSIM benzetim programında analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre en uygun parametre değerlerinin ve sönümlenme direnç değerinin hangisinin olacağı belirlenmiştir.

2. LCL Filtre Parametre Değerlerinin Hesabı

LCL filtrelili bir fazlı şebeke etkileşimli evirici devresi Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1: LCL filtrelili bir fazlı evirici devresi.

LCL filtre parametre değerlerinin ve seri sönümlenme direnç değerinin hesaplanabilmesi için evirici devresine ait değişkenlerin değerlerinin belirlenmesi gerekir. Tablo 1'de evirici devresinin değişkenlerine ait değerler verilmiştir.

Tablo 1: Evirici devresinin değişkenleri

Değişken	Değeri
Şebekenin RMS Gerilimi (V_s)	220 V
Eviricinin Gücü (P_o)	1 kW
Giriş Gerilimi (V_{DA})	400 V
Şebeke Frekansı (f_s)	50 Hz
Anahtarlama Frekansı (f_a)	10 kHz

Evirici tarafındaki bobinin endüktans (L_e) değeri aşağıdaki denklemler yardımıyla bulunur.

$$\Delta i_{L-\max} = a \frac{P_o \sqrt{2}}{V_s} \quad (1)$$

$$L_e = \frac{V_{DA}}{16 f_a \Delta i_{L-\max}} \quad (2)$$

Denklem (1)'de "a" akımın dalgalanma oran miktarıdır. LCL filtresinin kapasitör değeri aşağıdaki denklem ile hesaplanır.

$$C_f \leq \frac{\%5 P_o}{2 \pi f_s V_s^2} \quad (3)$$

LCL filtrede şebeke tarafındaki bobinin endüktans (L_s) değeri hesaplanırken şebeke ile evirici bobinleri arasındaki "r" katsayısından yararlanır. Bu katsayı değeri $0 < r \leq 1$ aralığındadır. L_s , Denklem (4) ile bulunur.

$$L_s = L_e r \quad (4)$$

Denklemler yardımıyla $L_e = 3,9$ mH, $C_f = 2,2$ μ F ve $L_s = 2,6$ mH olarak hesaplanmıştır. Şebeke akımındaki osilasyonların engellenebilmesi için filtre kapasitörüne seri bir sönümlenme direnci (R_{sd}) ilave edilir. Bu seri sönümlenme direncinin değeri aşağıdaki denklem yardımıyla hesaplanır.

$$R_{sd} = \frac{1}{3 \omega_{rez} C_f} \quad (5)$$

Denklem (5) teki rezonans frekansının açısal hızı (ω_{rez}) ise Denklem (6) ile bulunur.

$$\omega_{rez} = \sqrt{\frac{L_e + L_s}{L_e L_s C_f}} \quad (6)$$

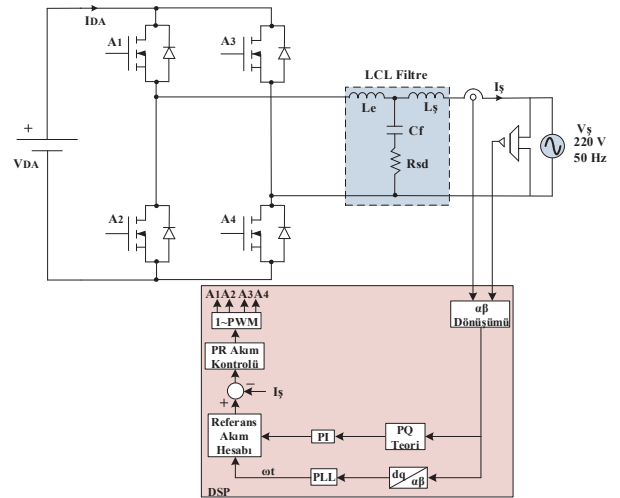
Ayrıca rezonans frekans (f_{rez}) değeri, Denklem (7)'deki frekans aralıklarında yer almalıdır [14, 15].

$$10 f_s \leq f_{rez} \leq \frac{1}{2} f_a \quad (7)$$

Denklem (5) ve (6) kullanılarak devrenin sönümlenme direnç değeri $R_{sd} = 8,8 \Omega$ olarak bulunmuştur.

3. PR Akım Kontrolü ve PLL Algoritması

LCL filtrelili PR akım kontrollü bir fazlı şebeke etkileşimli eviricinin kontrol blok şeması Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2: Sistemin kontrol blok şeması.

Şebekeye bağlı sistemlerde çoğunlukla oransal integral (PI) ile PR akım kontrol yöntemleri kullanılmaktadır. Her iki

yöntemde birbirine benzer olup birçok ortak noktaları bulunmaktadır. PR kontrol yönteminde integral, rezonans frekansına yakın frekans değerlerinde işlem yapar. Ayrıca PR denetleyici, PI denetleyicinin bilinen iki önemli dezavantajını ortadan kaldırarak sinüzoidal referanslı sıfır kararlı durum hatasının takip edilmesini ve parazitlerin engellenmesini sağlar.

Sistemde harmonik bileşenlerinin azaltılabilmesi için ideal olmayan PR akım kontrol yöntemi kullanılmış olup Denklem (8)'de formülü verilmiştir.

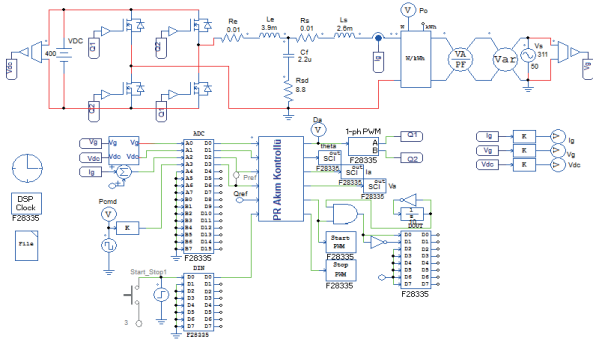
$$G_{pr}(s) = K_p + \frac{2K_i\omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + \omega_s^2} \quad (8)$$

Burada, ω_s şebekenin açısal frekansı, K_p ve K_i değerleri ise sırasıyla oransal ve integral kazanç değerleridir. ω_c ise kesim açısal frekansdır [15, 16].

Şebeke etkileşimli eviricilerde şebeke frekansının kontrolü için faz kilitleme döngü (PLL) algoritmasının kullanılması gerekir. Çalışmada T/4 gecikmeli PLL algoritması kullanılmıştır. Öncelikle bir faz, T/4 gecikme yapılarak sabit $\alpha\beta$ eksen takımına dönüştürülmüştür. Sabit $\alpha\beta$ eksen takımı da Park dönüşümü ile dq eksen takımına dönüştürülerek PLL algoritmasında kullanılmıştır. PLL algoritmasından elde edilen ωt akım hesabında kullanılmış olup PR akım kontrolünden geçirilerek anahtar sinyalleri elde edilmiştir [15].

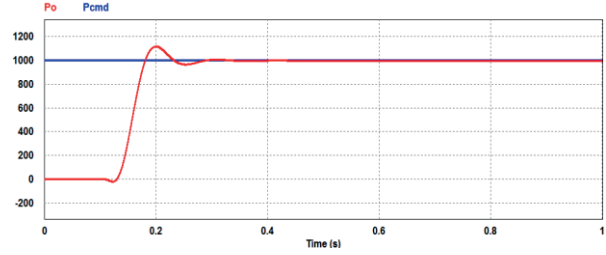
4. Benzetim Sonuçları

LCL filtreli bir fazlı şebeke etkileşimli eviricinin PSIM benzetim programındaki ekran görüntüsü Şekil 3'te gösterilmiştir.



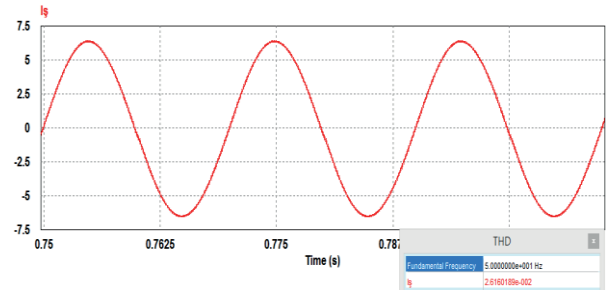
Şekil 3: PSIM benzetim programındaki ekran görüntüsü.

Sistemde öncelikle hesaplanan değerlere göre şebeke akımının THD değeri ve sönümlenme direncinin neden olduğu kayıp belirlenmiştir. Daha sonra hesaplanan her bir değer sırasıyla \pm %50 değişmesi durumunda elde edilen THD değeri ve seri sönümlenme direncinin oluşturduğu kayıp miktarı bulunarak sistem için uygun parametre değerleri belirlenmiştir. Çalışmada parametre değişimi, Denklem (7) dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Sistemde evirici çıkış gücüne (P_o) ait benzetim sonucu Şekil 4'te verilmiştir.



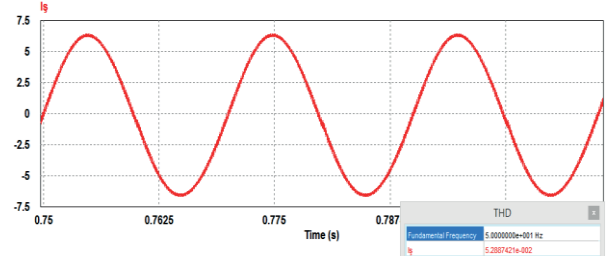
Şekil 4: Evirici çıkış gücü.

Denklemler yardımıyla hesaplanan $L_e = 3,9$ mH, $C_f = 2,2$ μ F, $L_s = 2,6$ mH ve $R_{sd} = 8,8$ Ω değerlerine göre şebeke akımının dalga şekli Şekil 5'te gösterilmiştir.



Şekil 5: Hesaplanan değerlere göre şebeke akımı.

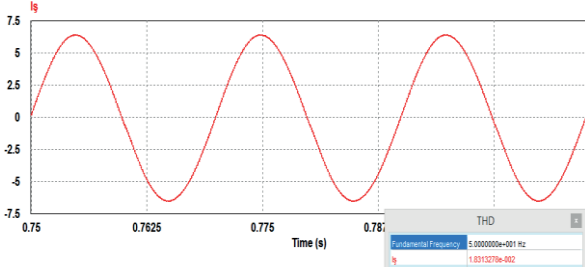
Şebeke akımının THD değeri %2,61 olup sönümlenme direnci üzerindeki kayıp 13,32 W olarak hesaplanmıştır. L_e değerinin %50 düşürülmesi durumunda $L_e = 1,95$ mH, $C_f = 2,2$ μ F, $L_s = 2,6$ mH ve $R_{sd} = 8,8$ Ω değerlerine göre şebeke akımının dalga şekli Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6: $L_e = 1,95$ mH değerinde iken şebeke akımı.

L_e değeri %50 düşürüldüğünde şebeke akımının THD değeri %5,28 bulunmuştur. Bu değer uluslararası standartların belirlediği değerden (\leq %5) yüksektir. Sönümlenme direncinin neden olduğu kayıp ise 51,11 W olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan kayıp güç miktarı da oldukça yüksektir.

L_e değerinin %50 artırılması durumunda $L_e = 5,85$ mH, $C_f = 2,2$ μ F, $L_s = 2,6$ mH ve $R_{sd} = 8,8$ Ω değerlerine göre şebeke akımının dalga şekli Şekil 7'de gösterilmiştir.

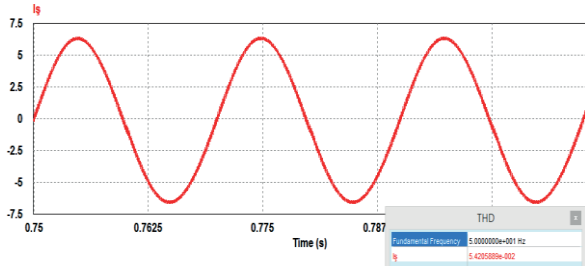


Şekil 7: $L_e = 5,85$ mH değerinde iken şebeke akımı.

L_e değeri %50 arttırıldığında şebeke akımının THD değeri %1,83 olarak bulunmuştur. Sönümlenme direncinin neden olduğu kayıp ise 4,95 W olarak hesaplanmıştır.

Benzetim sonuçlarına göre L_e değerinin azaltılması THD değerini arttırırken aynı zamanda sönümlenme direncinin neden olduğu kayıp miktarını da oldukça yükseltmiştir. Elde edilen sonuçlara göre LCL filtre çalışmalarında L_e değerinin arttırılması ile daha iyi sonuçlar elde edileceği ortaya çıkmaktadır.

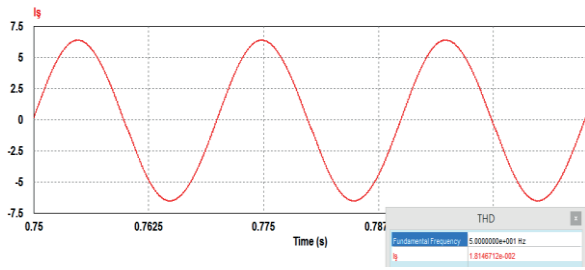
L_s değerinin %50 düşürülmesi durumunda $L_e = 3,9$ mH, $C_f = 2,2$ μ F, $L_s = 1,3$ mH ve $R_{sd} = 8,8$ Ω değerlerine göre şebeke akımının dalga şekli Şekil 8’de verilmiştir.



Şekil 8: $L_s = 1,3$ mH değerinde iken şebeke akımı.

L_s değeri %50 düşürüldüğünde şebeke akımının THD değeri %5,42 bulunmuştur. Bu değer uluslararası standartların belirlemiş olduğu değerden (\leq %5) yüksektir. Sönümlenme direncinin neden olduğu kayıp ise 12,25 W olarak hesaplanmıştır.

L_s değerinin %50 arttırılması durumunda $L_e = 3,9$ mH, $C_f = 2,2$ μ F, $L_s = 3,9$ mH ve $R_{sd} = 8,8$ Ω değerlerine göre şebeke akımının dalga şekli Şekil 9’da gösterilmiştir.



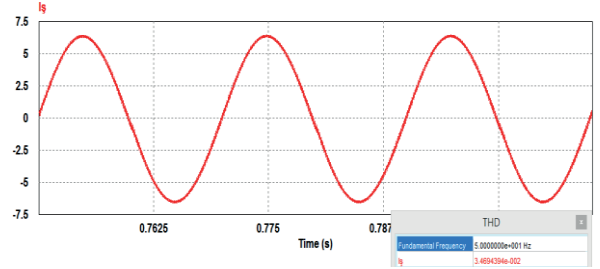
Şekil 9: $L_s = 3,9$ mH değerinde iken şebeke akımı.

L_s değeri %50 arttırıldığında şebeke akımının THD değeri %1,81 olarak bulunmuştur. Sönümlenme direncinin neden olduğu kayıp ise 11,43 W olarak hesaplanmıştır.

Benzetim sonuçlarına göre L_s değerinin artması veya azalması kayıp güç miktarını fazla etkilememiştir. Fakat L_s değerinin azaltılması THD değerini arttırmıştır. Bu durumda THD

değerinin azaltılması isteniyorsa LCL filtre tasarımında L_s değerinin arttırılmasının uygun olacağı görülmektedir.

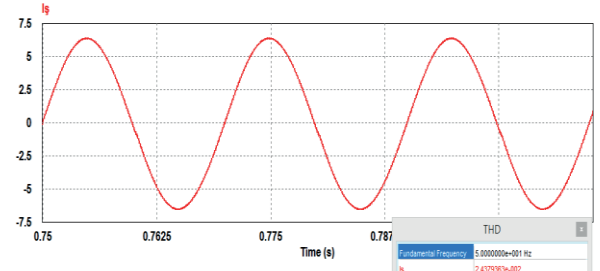
C_f değerinin %50 düşürülmesi durumunda $L_e = 3,9$ mH, $C_f = 1,1$ μ F, $L_s = 2,6$ mH ve $R_{sd} = 8,8$ Ω değerlerine göre şebeke akımının dalga şekli Şekil 10’da verilmiştir.



Şekil 10: $C_f = 1,1$ μ F değerinde iken şebeke akımı.

C_f değeri %50 düşürüldüğünde şebeke akımının THD değeri %3,46 olarak bulunmuştur. Sönümlenme direncinin neden olduğu kayıp ise 13,32 W olarak hesaplanmıştır.

C_f değerinin %50 arttırılması durumunda $L_e = 3,9$ mH, $C_f = 3,3$ μ F, $L_s = 2,6$ mH ve $R_{sd} = 8,8$ Ω değerlerine göre şebeke akımının dalga şekli Şekil 11’de gösterilmiştir.

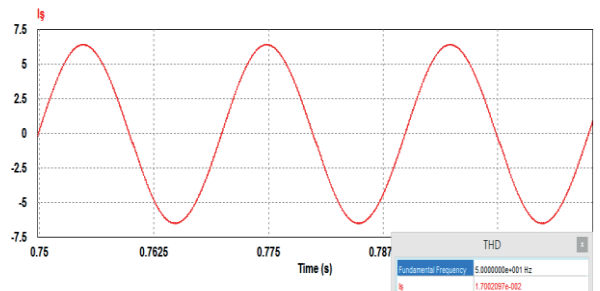


Şekil 11: $C_f = 3,3$ μ F değerinde iken şebeke akımı.

C_f değeri %50 arttırıldığında şebeke akımının THD değeri %2,43 olarak bulunmuştur. Seri sönümlenme direncinin neden olduğu kayıp ise 10,84 W olarak hesaplanmıştır.

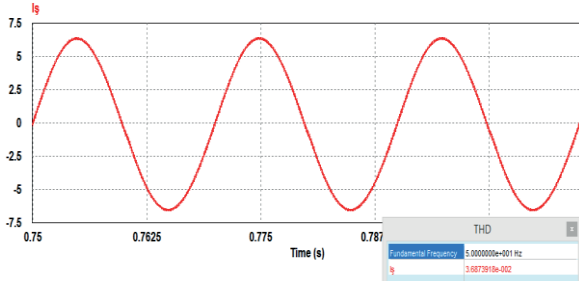
Benzetim sonuçlarına göre C_f değerinin artması veya azalması seri sönümlenme direncinin neden olduğu kayıp çok fazla değiştirmemiştir. Aynı zamanda şebeke akımının THD değeri de uluslararası standartların belirlemiş olduğu sınır değerinin altındadır. Yani, bu durumda akımın THD değeri de büyük oranda değişmemiştir.

R_{sd} değerinin %50 düşürülmesi durumunda $L_e = 3,9$ mH, $C_f = 2,2$ μ F, $L_s = 2,6$ mH ve $R_{sd} = 4,4$ Ω değerlerine göre şebeke akımının dalga şekli Şekil 12’de verilmiştir.



Şekil 12: $R_{sd} = 4,4$ Ω değerinde iken şebeke akımı.

R_{sd} değeri %50 düşürüldüğünde şebeke akımının THD değeri %1,7 olarak bulunmuştur. Sönümlenme direncinin neden olduğu kayıp ise 5,61 W olarak hesaplanmıştır. R_{sd} değerinin %50 artırılması durumunda $L_e = 3,9$ mH, $C_f = 2,2$ μ F, $L_s = 2,6$ mH ve $R_{sd} = 13,2$ Ω değerlerine göre şebeke akımının dalga şekli Şekil 13'te gösterilmiştir.



Şekil 13: $R_{sd} = 13,2$ Ω değerinde iken şebeke akımı.

R_{sd} değeri %50 arttırıldığında şebeke akımının THD değeri %3,68 olarak bulunmuştur. Sönümlenme direncinin neden olduğu kayıp ise 16,85 W olarak hesaplanmıştır. Benzetim sonuçlarına göre R_{sd} değerinin azaltılması hem kayıp güç miktarının hem de akımın THD değerinin önemli ölçüde azalmasını sağlamıştır. Bu durumda sönümlenme direncinin neden olduğu kayıp güç miktarının ve şebeke akımının THD değerinin azaltılması isteniyorsa LCL filtre tasarımında R_{sd} değerinin azaltılmasının uygun olacağı görülmektedir. Benzetim sonuçlarından elde edilen değerler Tablo 2'de sunulmuştur.

Tablo 2: Benzetim sonuçları

LCL Filtre Parametreleri	THD	Güç Kaybı
$L_e = 3,9$ mH, $C_f = 2,2$ μ F, $L_s = 2,6$ mH, $R_{sd} = 8,8$ Ω	%2,61	13,32 W
$L_e = 1,95$ mH, $C_f = 2,2$ μ F, $L_s = 2,6$ mH, $R_{sd} = 8,8$ Ω	%5,28	51,11 W
$L_e = 5,85$ mH, $C_f = 2,2$ μ F, $L_s = 2,6$ mH, $R_{sd} = 8,8$ Ω	%1,83	4,95 W
$L_e = 3,9$ mH, $C_f = 2,2$ μ F, $L_s = 1,3$ mH, $R_{sd} = 8,8$ Ω	%5,42	12,25 W
$L_e = 3,9$ mH, $C_f = 2,2$ μ F, $L_s = 3,9$ mH, $R_{sd} = 8,8$ Ω	%1,81	11,43 W
$L_e = 3,9$ mH, $C_f = 1,1$ μ F, $L_s = 2,6$ mH, $R_{sd} = 8,8$ Ω	%3,46	13,32 W
$L_e = 3,9$ mH, $C_f = 3,3$ μ F, $L_s = 2,6$ mH, $R_{sd} = 8,8$ Ω	%2,43	10,84 W
$L_e = 3,9$ mH, $C_f = 2,2$ μ F, $L_s = 2,6$ mH, $R_{sd} = 4,4$ Ω	%1,7	5,61 W
$L_e = 3,9$ mH, $C_f = 2,2$ μ F, $L_s = 2,6$ mH, $R_{sd} = 13,2$ Ω	%3,68	16,85 W

5. Sonuçlar

Bu çalışmada 1 kW gücündeki bir fazlı şebeke etkileşimli eviricinin LCL filtre parametre değerleri ve seri sönümlenme direnç değeri hesap edilerek bu değerlerin \pm %50 değişmesi durumunda sistemde meydana gelen değişiklikler PSIM benzetim programında analiz edilmiştir. Analiz sonuçlarına göre hesap edilen seri sönümlenme direnci R_{sd} nin düşürülmesi

hem şebeke akımının THD değerini hem de sönümlenme direncinin neden olduğu kayıp güç miktarını düşürmüştür. Evirici tarafındaki L_e bobininin değerinin arttırılması yine hem şebeke akımının THD değerini hem de sönümlenme direncinin neden olduğu kayıp güç miktarını düşürmüştür. L_e bobininin değerinin azaltılması ise hem şebeke akımının THD değerini hem de sönümlenme direncinin neden olduğu kayıp güç miktarını önemli ölçüde arttırmıştır. Şebeke tarafındaki L_s bobin değerinin azaltılması ise akımın THD değerinin uluslararası standartların belirlemiş olduğu sınır değeri olan %5'i aşmasına neden olmuştur. Elde edilen sonuçlara göre LCL filtre tasarımında hesap edilen parametre değerlerinden L_e ve L_s bobin değerlerinin arttırılması ile hem THD değerinin hem de kayıp güç miktarının azalacağı görülmüştür. Seri sönümlenme direncinin ise düşük değerlerde tutulmasının uygun olacağı belirlenmiştir.

Kaynaklar

- [1] Karafil, A., Özbay, H., "Design of Stand-Alone PV System on a Farm House in Bilecik City, Turkey", *El-Cezeri Journal of Science and Engineering*, 5, (3), pp. 909-916, 2018.
- [2] Al-Shetwi, A. Q., Hannan, M. A., Jern, K. P., et al., "Grid-Connected Renewable Energy Sources: Review of the Recent Integration Requirements and Control Methods", *Journal of Cleaner Production*, 253, pp. 119831, 2020.
- [3] Karafil, A., Ozbay, H., Oncu, S., "Design and Analysis of Single Phase Grid Tied Inverter with PDM MPPT Controlled Converter", *IEEE Transactions on Power Electronics*, 35, (5), pp. 4756-4766, 2020.
- [4] Kabalcı, E., "Review on Novel Single-Phase Grid-Connected Solar Inverters: Circuits and Control Methods", *Solar Energy*, 198, pp. 247-274, 2020.
- [5] Jana, J., Saha, H., Bhattacharya, K. D., "A Review of Inverter Topologies for Single-Phase Grid-Connected Photovoltaic Systems", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72, pp. 1256-1270, 2017.
- [6] Sefa, I., Altın, N., "Grid Interactive Photovoltaic Inverters-A Review", *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 24, (3), pp. 409-424, 2009.
- [7] Hassaine, L., Bengourina, M. R., "Control Technique for Single Phase Inverter Photovoltaic System Connected to the Grid", *Energy Reports*, 6, pp. 200-208, 2020.
- [8] Büyük, M., Tan, A., Tümay, M., et al., "Topologies, Generalized Designs, Passive and Active Damping Methods of Switching Ripple Filters for Voltage Source Inverter: A Comprehensive Review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, pp. 46-69, 2016.
- [9] Mahlooji, M. H., Mohammadi, H. R., Rahimi, M., "A Review on Modeling and Control of Grid-Connected Photovoltaic Inverters with LCL Filter", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, pp. 563-578, 2018.
- [10] Bighash, E. Z., Sadeghzadeh, S. M., Ebrahimzadeh, E., et al., "Robust MPC-Based Current Controller against Grid Impedance Variations for Single-Phase Grid-Connected Inverters", *ISA Transactions*, 84, pp. 154-163, 2019.
- [11] Chatterjee, A., Mohanty, K. B., "Current Control Strategies for Single Phase Grid Integrated Inverters for

- Photovoltaic Applications-A Review". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 92, pp. 554-569, 2018.
- [12] Zeb, K., Uddin, W., Khan, M. A., *et al.*, "A Comprehensive Review on Inverter Topologies and Control Strategies for Grid Connected Photovoltaic System", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 94, pp. 1120-1141, 2018.
- [13] Bighash, E. Z., Sadeghzadeh, S. M., Ebrahimzadeh, E., *et al.*, "High Quality Model Predictive Control for Single Phase Grid-Connected Photovoltaic Inverters", *Electric Power Systems Research*, 158, pp. 115-125, 2018.
- [14] Karafil, A., Özbay, H., Öncü, S., "Bir Fazlı Şebeke Etkileşimli Evirici Tasarımı için LCL Filtre Analizi", *International Conference on Data Science and Applications (ICONDATA)*, 2018, pp. 560-574.
- [15] Karafil, A., "Pasif Seri Sönümleme Direncinin LCL Filtreli Bir Fazlı Şebeke Etkileşimli Evirici Üzerine Etkisi", *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, <http://doi:10.5505/pajes.2020.99896>, 2020.
- [16] Athari, H., Niroomand, M., Ataei, M., "Review and Classification of Control Systems in Grid-Tied Inverters", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72, pp. 1167-1176, 2017.

AKİF KARAFİL



Akif Karafil, 1983 Bursa doğumludur. 2007 yılında Marmara Üniversitesi Elektrik Eğitimi Bölümünden lisans derecesini, 2011 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü'nden yüksek lisans derecesini, 2018 yılında Karabük Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümünden doktora derecesini aldı. 2008-2011 yılları arasında Giresun Üniversitesi'nde, 2011-2020 yılları arasında ise Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi'nde Öğretim Görevlisi olarak görev yaptı. 2020 yılından itibaren Yalova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümünde öğretim üyesi olarak görev yapmaktadır. Çalışma alanları güç elektroniği, rezonans dönüştürücüler, indüksiyon ısıtma sistemleri, şebeke etkileşimli eviriciler, maksimum güç noktası izleme algoritmaları, pals yoğunluk modülasyonu kontrolü, elektrikli araçlar ve fotovoltaik sistem uygulamaları üzerinedir.

Serbest Uzay Optik Haberleşme Sistemlerinde Turbo Çarpım Kodların Performans Analizi

Performance Analysis of Turbo Product Codes on Free Space Optics Communication Systems

Mert Bayraktar 

Hasan Kalyoncu Üniversitesi Mühendislik Fakültesi
Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Gaziantep, Türkiye
mert.bayraktar@hku.edu.tr

Öz

Bu makalede, turbo çarpım kodlarının(TPC) serbest uzay optik(FSO) sistemlerinin performansına olan etkisi incelenmiştir. Atmosfer modeli olarak log-normal dağılım seçilmiştir. MATLAB benzetim çalışmaları zayıf ve orta türbülansla gerçekleştirilmiştir. Turbo çarpım kodlarını oluşturan kod bileşenleri, genişletilmiş hamming ve genişletilmiş Bose–Chaudhuri–Hocquenghem(BCH) kodları olarak kullanılmıştır. Benzetim sonuçlarına göre, özellikle ortatürbülans altında TPC kullanımı ile hedeflenen bit hata oranına(bit error rate(BER))ulaşırken 15dB'ye kadar kod kazancı sağlanabilmektedir. Bu kod kazancı BCH tabanlı TPC kullanılırsa daha fazla iken hamming tabanlı TPC kullanılırsa daha az olmaktadır. Düşük kod oranlı ve BCH kod bileşeni ile oluşturulan TPC ile 0dB sinyal-gürültü oranı(signal to noise ratio(SNR)) değerinde bile sistemin BER'i 10^{-5} 'e düşebilmektedir.

Anahtar kelimeler: Turbo çarpım kodu, serbest uzay optik, bit hata oranı, atmosferik türbülans.

Abstract

In this article, the effect of turbo product codes(TPC) on the performance of free space optics systems is analyzed. Log-normal distribution is selected as the turbulence model. MATLAB simulations are carried out in weak and moderate turbulence. Component codes which construct turbo product codes are used as extended hamming and extended Bose–Chaudhuri–Hocquenghem(BCH) codes. According to simulation results, it can be provided that up to 15dB code gain to reach the target bit error rate(BER) with the use of TPC especially under moderate turbulence. While this code gain is more if BCH based TPC is used, it becomes less if hamming based TPC is used. With low code rate and TPC which is constructed with BCH code component, BER of system can decrease to 10^{-5} even in 0dB signal to noise ratio(SNR).

Keywords: Turbo product code, free space optic, bit error rate, atmospheric turbulence.

1. Giriş

İleri hata düzeltme (Forward error correction (FEC)) kodları bit hata oranını düşürmek için kablosuz haberleşme sistemlerinde oldukça sık kullanılan bir yöntemdir. Bu doğrultuda, Elias çarpım(product) kodlarını bilim dünyasına ilk tanıtan ilk bilim insanı olmuştur[1]. Daha sonra ise Turbo kodlar bilim dünyamıza girmiş ve oldukça sık kullanılmıştır[2]. Bu bilgilerin ışığında Turbo çarpım kodları[3]'de tanıtılmış ve Shannon kanal kapasitesine yakın sonuçlar sağladığı gösterilmiştir. TPC'nin basit kodlama ve çözümlene özellikleri [4]'te vurgulanmıştır. [5]'te yüksek kod oranlarında TPC'nin yüksek kod kazancı sağladığı vurgulanmıştır. Ayrıca TPC'ler yüksek bit oranı ihtiyacı olan sistemlerde düşük gecikme sağlamaktadır [6]. Yüksek bit oranı sağlayan sistemlerden biri de fiber optik haberleşme sistemleridir. Bu doğrultuda, TPC fiber haberleşme sistemlerine de uygulanmış ve sonuçları bilim dünyası ile paylaşılmıştır. 10Gbps bit oranında çalışan bir fiber optik haberleşme sistemine TPC uygulanmış ve kod kazancı 10 dB olarak gözlemlenmiştir [7]. Bir başka çalışmada ise BCH tabanlı TPC kullanarak 100Gbps bit oranında fiber optik haberleşme sisteminde ölçümler yapılmış ve hedef BER 10^{-15} değerinde kod kazancı 10 dB çıkmıştır[8]. Bu özelliklerini göz önünde bulundurarak, IEEE TPC'nin kullanılmasını bazı haberleşme sistemlerinde standartlaştırmıştır. TPC'ler güç hattı ağlarının haberleşme standardı olan IEEE-1901 nolu standartta yerini almıştır [9]. Bunun yanında mobil geniş bant kablosuz erişim(MBWA) standardı [10] olan IEEE 802.20'de ve WiMAX standardı[11] olan IEEE 802.16'da yerini almıştır.

Serbest uzay optik teknolojisi atmosfer üzerinden yüksek bant genişliğinde veri ileten optik bir haberleşme sistemidir. 5G ile birlikte artan düşük gecikme ihtiyacı ile tekrar popüler olması öngörülmektedir. Ancak haberleşme kanalı atmosfer olduğundan, sistem performansı atmosfere doğrudan bağlıdır. Bu bağlamda, bilim insanları FSO sistemlerinin performansını iyileştirmek üzere çalışmalar yapmaktadır. FEC uygulamaları da bunlardan bir tanesidir. Yazarlar, BCH

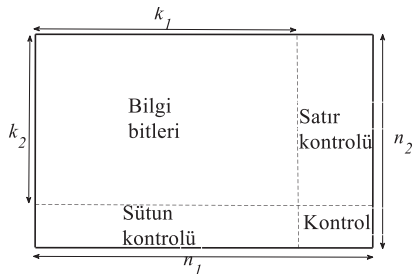
kod ile 10km'ye kadar kablosuz optik link kurmuşlardır [12]. Gamma-gamma dağılımlı zayıf türbülans şartlarında, düşük yoğunluklu benzerlik kontrolü(Low density parity check(LDPC)) kodları kullanarak yapılan deneyde ise 10^{-6} BER değerinde 1.8dB SNR kazancı sağlanmıştır[13]. Aynı kod çeşidi ile FPGA tabanlı yapılan deneysel bir çalışma da gösteriyor ki yüksek kod oranları ile düşük SNR değerlerinde 10^{-8} 'in altında BER değerlerine ulaşılabilir[14]. Son yıllarda trend olan polar kodların FSO'ya uygulanması ile LDPC koda ek olarak 1.6dB net kod kazancı sağladığı görülmüştür [15].

Bu çalışmanın amacı, serbest uzay optik haberleşme sistemlerinde kanal kodlama yaparak daha düşük bit hata oranı elde etmektir. Bu amaç doğrultusunda turbo çarpım kodları kullanılmıştır. TPC'nin satır ve sütunların da genişletilmiş BCH ve genişletilmiş hamming kodlar olmak üzere iki farklı kod türü kullanılmış ve bunların performans etkisi gözlemlenmiştir. Atmosfer modeli olarak log-normal dağılıma sahip atmosfer modeli seçilmiştir. Deneyler, zayıf ve orta şiddetli türbülans olmak üzere iki farklı şart altında yapılmış ve bit hata oranları karşılaştırılmıştır.

2. Sistem Yapısı

2.1. TPC Yapısı

2 boyutlu turbo çarpım kodları C^j ($j = 1, 2$) bileşenlerinden oluşmaktadır. Bu bileşenler BCH [16], hamming[17], Reed-solomon [18] veya diğer kodlardan seçilebilir. C^j kod bileşenleri (n_j, k_j) şeklinde ifade edilmektedir. Burada k_j bilgi bitlerinin sayısını ve n_j kod kelimesi uzunluğunu göstermektedir. TPC kodlama sırasında bilgi bitleri şekil 1'de görüldüğü üzere $k_1 \times k_2$ matrisi şeklinde yerleştirilir.



Şekil 1: Turbo çarpım kodunun iki boyutlu görüntüsü

Daha sonra sırayla aşağıdaki basamaklar gerçekleştirilir[19]:

- k_1 tane satır, C^1 kodu ile kodlanır ve $k_1 \times n_1$ boyutlu matris elde edilir.
- Bu matristeki n_1 tane sütun, C^2 kodu ile kodlanır ve $n_2 \times n_1$ boyutlu matris elde edilir.

Bu işlemlerin sonucunda elde edilen kod kelimesinin özellikleri $(n_1 \times n_2, k_1 \times k_2)$ şeklinde gösterilmekte olup kod oranı ise $(k_1 \times k_2)/(n_1 \times n_2)$ şeklinde hesaplanmaktadır.

Bu çalışmada TPC'yi oluşturan kod bileşenleri genişletilmiş hamming ve genişletilmiş BCH kodları olarak seçilmiştir. Kullanılan kodların kod parametreleri tablo 1'de verilmiştir. Simetrik TPC kullanıldığından yani $n_1 = n_2$ ve $k_1 = k_2$ olduğundan TPC kodları $(n_{1,2}, k_{1,2})^2$ ile ifade edilmektedir.

Tablo 1: Kullanılan kod çifti değerleri

Genişletilmiş hamming		Genişletilmiş BCH	
Kod parametreleri	Kod oranı	Kod parametreleri	Kod oranı
$(8, 4)^2$	0.25	-	-
$(16, 11)^2$	0.47	$(16, 7)^2$	0.19
$(32, 26)^2$	0.66	$(32, 21)^2$	0.43
$(64, 57)^2$	0.79	$(64, 51)^2$	0.63

TPC çözümleyici olarak ise MATLAB'ın da sağlamış olduğu yumuşak girdi yumuşak çıktı (soft input soft output (SISO)) tipi çözümleyici kullanılmıştır. Bu çalışmada, çözümleyicideki tekrarlar sayısı 3 olarak alınmıştır. Bunun sebebi ise tekrarlar sayısı 3'ten sonra çözümleyicideki bit hata oranında çok büyük bir değişiklik olmamasıdır [3].

2.2. Kanal Modeli

FSO sistemlerinde haberleşme kanalı atmosferdir. Bu nedenle atmosferik türbülansın direkt olarak etkilenirler. Bu çalışmada genellikle zayıf-orta türbülansın geçerli olan log-normal dağılımlı atmosferik türbülans kullanılmıştır. Kullanılan atmosferik türbülansın yapısı için log-normal olasılık yoğunluk fonksiyonu(pdf)[20] log parıldama varyansı kullanarak

$$p(I) = \frac{1}{I\sqrt{2\pi\sigma_I^2}} \exp\left(-\frac{(\ln(I/I_0) - E[I])^2}{2\sigma_I^2}\right) \quad (1)$$

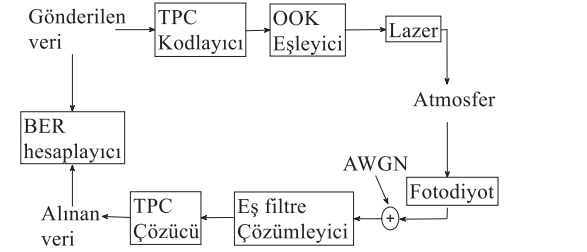
şeklinde verilmektedir. Denklem 1'de $E[I]$, I 'nin beklenen değeri ve düzlemsel dalga için log parıldama varyansı

$$\sigma_I^2 = 1.23 C_n^2 k^{7/6} L^{1/6} \quad (2)$$

Denklem 2'de, L haberleşme mesafesini, k dalga sayısını ve C_n^2 türbülans şiddetini belirten kırınım indisi yapı sabitini temsil etmektedir.

Denklem 1 ve 2 kullanılarak MATLAB'da benzetim ortamı oluşturulmuştur. Bu benzetim çalışmalarında haberleşme mesafesi sabit 5km olarak alınmış, türbülansın şiddeti ise iki farklı şekilde zayıf türbülans $C_n^2 = 10^{-16} m^{-2/3}$ ve orta türbülans $C_n^2 = 10^{-14} m^{-2/3}$ olarak seçilmiştir. C_n^2 , kırınım indisi yapı sabitidir ve atmosferik türbülansın şiddetini belirlemede kullanılır. Kullanılan deney düzeneğinin örnek

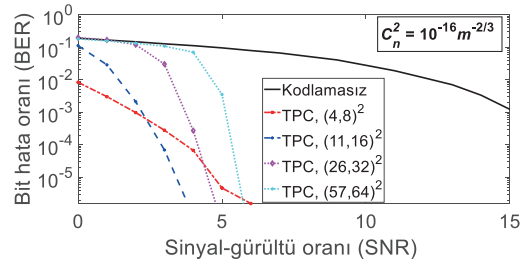
blok şeması şekil 2’de görülmektedir. Bu şekilde gösterilen AWGN eklenebilir beyaz Gauss gürültüsünü(additive white Gaussian noise) temsil etmektedir.



Şekil 2: Tasarlanan optik haberleşme sisteminin blok şeması

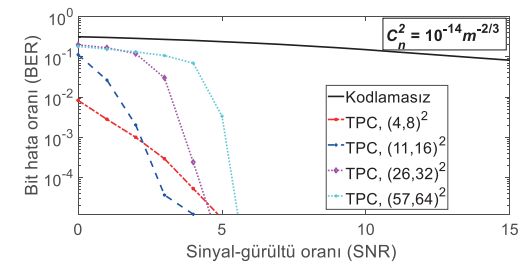
3. Benzetim Sonuçları

Çalışmanın bu bölümünde MATLAB ortamında gerçekleştirilen benzetim sonuçları değerlendirilmiştir. Şekil 3 ve 4’te genişletilmiş hamming kod bileşeninden yaratılan turbo çarpım kodlarının zayıf ve orta şiddetli türbülansa BER performansı görülmektedir. Şekil 3 ve 4’ten görüldüğü üzere, düşük kod oranı ile düşük SNR değerlerinde daha fazla kazanç elde etmek mümkündür. SNR değeri 6dB’nin üzerine çıktığında ise daha daha yüksek kod oranına sahip kod çiftleri daha fazla avantaj sağlamaktadır.



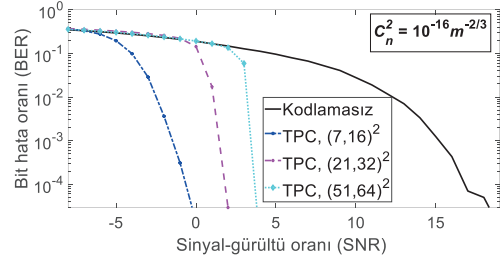
Şekil 3: Zayıf türbülans genişletilmiş hamming kod tabanlı TPC’nin BER performansı.

Şekil 3 ve 4’ü karşılaştırdığımızda ise TPC’nin türbülans şiddetinin artması ile daha fazla avantaj sağladığı göze çarpmaktadır. Kod oranı arttığında bile TPC, gösterilen SNR bölgesi içerisinde özellikle orta şiddetli türbülansa 10^{-3} kadar düşük bit hata oranı sağlayabilmektedir.



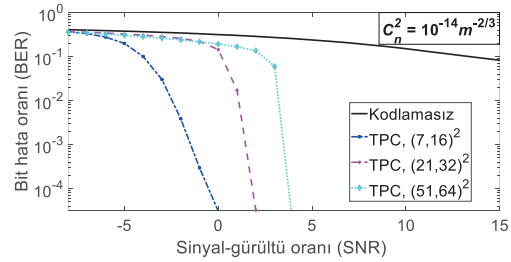
Şekil 4: Orta türbülansa genişletilmiş hamming kod tabanlı TPC’nin BER performansı.

Şekil 5 ve 6’da TPC kod bileşeni olarak BCH kod kullanıldığında FSO sisteminin BER performansı görülmektedir. Bu şekillerden görüldüğü üzere, düşük kod oranlı TPC kullanıldığında 10^{-5} hedef BER değerine ulaşırken yaklaşık 16dB kod kazancı sağlanmaktadır. En yüksek kod oranlı TPC $(64,51)^2$ kullanıldığında kod kazancı yaklaşık 12dB olmaktadır.



Şekil 5: Zayıf türbülansa genişletilmiş BCH kod tabanlı TPC’nin BER performansı.

Şekil 6’a baktığımızda ise orta türbülansa kullanılacak kod oranına göre yaklaşık 4dB SNR değeri ile en az 10^{-5} BER değerine ulaşmak mümkün olduğu görülmektedir.



Şekil 6: Orta türbülansa genişletilmiş BCH kod tabanlı TPC’nin BER performansı.

Şekil 3 il 5 ve 4 ile 6 kendi içlerinde karşılaştırıldığında ise TPC’nin kod bileşeni olarak genişletilmiş hamming ve genişletilmiş BCH kullanıldığında sistem performansının nasıl etkilendiğini görmekteyiz. Bu karşılaştırmalar gösteriyor ki, kod bileşeni olarak genişletilmiş BCH kullanıldığında hedef BER değerine ulaşmak için daha düşük SNR değeri yeterli olacaktır. Bir başka deyişle, genişletilmiş BCH kod kullanıldığında kod kazancı daha yüksek olmaktadır. Tüm sonuçlar karşılaştırıldığında ise turbo çarpım kodlarının avantajının türbülans şiddeti arttıkça ortaya çıktığı sonucuna varılmaktadır.

4. Sonuç

Bu makalede FSO sistemlerinde TPC kullanıldığında BER performansı analiz edilmiştir. MATLAB ortamında yapılan benzetimler ışığında TPC kullanımı ile hedef BER değerine ulaşırken 15dB kod kazancı sağlanabileceği görülmektedir. FSO sistemleri atmosferden çok etkilenmelerine rağmen, TPC kullanımı ile bu etkinin azaltılabileceği sonucu çıkarılmıştır. Özellikle türbülans şiddeti arttıkça genişletilmiş hamming kod bileşeninden oluşan TPC ile bit hata oranı

düşürebilir ve sistemin çökmesi engellebilir. Bu çalışmanın sonuçlarının FSO sistem tasarımcılarına yol göstereceği düşünülmektedir.

Kaynaklar

- [1] P. Elias, "Error-Free Coding," Trans. IRE Prof. Group Inf. Theory, vol. 4, no. 4, pp. 29-37, 1954.
- [2] C. Berrou and A. Glavieux, "Near Optimum Error Correcting Coding And Decoding: Turbo-Codes," IEEE Transactions On Communication, vol. 44, no. 10, pp. 1261-1271, 1996.
- [3] R. M. Pyndiah, "Near-Optimum Decoding of Product Codes: Block Turbo Codes," IEEE Transactions On Communications, vol. 46, no. 8, pp. 1003-1010, 1998.
- [4] J. Li, E. Kurtas, K. R. Narayanan, and C. N. Georghiadis, "On the Performance of Turbo Product Codes over Partial Response Channels," 37, no. 4, pp. 1932-1934, 2001.
- [5] C. Argon and S. W. McLaughlin, "Optical OOK-CDMA and PPM-CDMA systems with turbo product codes," Journal of Lightwave Technology, vol. 20, no. 9, pp. 1653-1663, 2002.
- [6] S. Lingyan, S. Hongwei, Z. Keirn, and B. V. K. V. Kumar, "Field programmable gate array (FPGA) for iterative code evaluation," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 42, no. 2, pp. 226-231, 2006.
- [7] T. Mizuochi et al., "Forward Error Correction Based on Block Turbo Code With 3-Bit Soft Decision for 10-Gb/s Optical Communication Systems," IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, vol. 10, no. 2, pp. 376-386, 2004.
- [8] Y. Miyata, K. Kubo, K. Onohara, W. Matsumoto, H. Yoshida, and T. Mizuochi, "UEP-BCH Product Code based Hard-Decision FEC for 100 Gb/s Optical Transport Networks," in Proc. Opt. Fiber Commun. Conf. Expo. Nat. Fiber Opt. Eng. Conf., Los Angeles, CA, USA, 2012, pp. 1-3.
- [9] IEEE Standard for Broadband over Power Line Networks: Medium Access Control and Physical Layer Specifications, 2010.
- [10] Air Interface for Mobile Broadband Wireless Access Systems Supporting Vehicular Mobility— Physical and Media Access Control Layer Specification, 2008.
- [11] Air Interface for Broadband Wireless Access Systems, 2009.
- [12] H. R. Khodadadi, M. H. Ghezal Ayagh, and A. Chaman Motlagh, "Analysis of link availability and capacity in multiple-input/single-output-Bose–Chaudhuri–Hocquenghem FSO systems under various turbulence conditions with pointing errors," IET Communications, vol. 11, no. 8, pp. 1305-1312, 2017.
- [13] L. Wang, R. Gao, X. Chen, Q. Xu, and Y. Tang, "QC-LPDC Code modulation with probabilistic shaping for atmospheric turbulence channel," Optics Communications, vol. 453, 2019.
- [14] X. Sun, D. Zou, Z. Qu, and I. B. Djordjevic, "Run-time reconfigurable adaptive LDPC coding for optical channels," Opt Express, vol. 26, no. 22, pp. 29319-29329, Oct 29 2018.
- [15] J. Fang et al., "Polar-Coded MIMO FSO Communication System Over Gamma-Gamma Turbulence Channel With Spatially Correlated Fading," Journal of Optical Communications and Networking, vol. 10, no. 11, 2018.
- [16] S. Hirasawa, M. Kasahara, Y. Sugiyama, and T. Namekawa, "Modified Product Codes," IEEE Transactions On Information Theory, vol. 30, no. 2, pp. 299-306, 1984.
- [17] X. Changlong, L. Ying-Chang, and L. Wing Seng, "Shortened Turbo Product Codes: Encoding Design and Decoding Algorithm," IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 56, no. 6, pp. 3495-3501, 2007.
- [18] Y. Wang, Y. Du, S. Yu, and K. T. Chan, "An Adaptive UEP BTC STBC OFDM System for Robust Video Transmission," presented at the 2005 IEEE 7th Workshop on Multimedia Signal Processing, USA, 2005.
- [19] H. Mukhtar, A. Al-Dweik, and A. Shami, "Turbo Product Codes: Applications, Challenges, and Future Directions," IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 18, no. 4, pp. 3052-3069, 2016.
- [20] Z. Ghassemlooy, W. Popoola, and S. Rajbhandar, Wireless Communications System and Channel Modelling with MATLAB. CRC Press, 2012, p. 575.

Mert BAYRAKTAR



Mert Bayraktar, elektronik ve haberleşme mühendisliği lisans derecesini 2013 yılında Çankaya Üniversitesinden almıştır. Aynı zamanda bilgisayar mühendisliği bölümünde çift anadal yapmıştır. Yüksek lisansını aynı üniversitede 2013 yılında serbest uzay optik sistemler üzerine yazdığı tez ile tamamlamıştır. Bayraktar, doktora derecesini aynı üniversitede 2015 yılında almıştır. Çalışma alanları arasında kablosuz iletişim, optik iletişim, görünür ışık haberleşmesi ve kanal kodlama yer almaktadır. Teknogirişim sermaye desteği ile serbest uzay optik ve görünür ışık haberleşme sistemlerinin prototipini tamamlamıştır. 5 adet SCI yayını bulunmaktadır. Halen Hasan Kalyoncu Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği bölümünde öğretim üyesi olarak çalışmaktadır.

TMMOB ELEKTRİK MÜHENDİSLERİ ODASI
EMO BİLİMSSEL HAKEMLİ DERGİ YAYIN YÖNERGESİ

Bu yönerge, Elektrik Mühendisleri Odası Yönetim Kurulunun 25.02.2020 tarih ve 46/88 sayılı toplantısında kabul edilerek yürürlüğe girmiştir. Yönetim Kurulunun 06.05.2016 tarih ve 45/06 sayılı toplantısında kabul edilen Yönerge yürürlükten kaldırılmıştır.

Kuruluş Esasları

Madde 1 - TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası (EMO)Yönetim Kurulu'nun 02.02.2010 tarih ve 41/58 toplantısında **EMO Bilimsel Dergi'nin (Dergi)** yayımlanması kabul edilmiş ve yürürlüğe girmiştir. **Dergi** hakemli bir dergidir ve derginin EMO adına sahibi Oda Yönetim Kurulu Başkanı'dır.

Yayın dili Türkçedir. "**Elektronik Mühendisliği, Bilgisayar Mühendisliği, Elektrik Mühendisliği, Haberleşme, Kontrol Mühendisliği ve Biyomedikal Mühendisliği**" konularında makaleler yayımlanır.

Amaç

Madde 2 - İş bu Yayın Yönergesi Dergi çalışmalarını yürüten birimler arasındaki ilişkileri, yetki ve sorumlulukları belirlemek amacıyla düzenlenmiştir.

Yayın Organları

Madde 3 - Dergi çalışmaları Danışma Kurulu, Yayın Kurulu ve Dergi Koordinatörü tarafından yürütülür.

A. Danışma Kurulu

Madde 4 – Danışma Kurulu üye sayısı Elektrik, Elektronik, Bilgisayar, Kontrol, Haberleşme ve Biyomedikal Mühendislik dalları arasından seçilecek en az 40 kişiden oluşur. Ülkemiz bilim ve teknoloji ekosistemindeki gelişmeler doğrultusunda mühendislik dallarında oluşabilecek değişikliklere bağlı olarak üye sayısı, EMO Yönetim Kurulu'nun vereceği karar ile yeniden düzenlenir.

Danışma Kurulu'nun üyelerinin seçilmesi, "Üye Belirleme Komisyonu" tarafından işbu Yönerge'de belirlenen ilkeler çerçevesinde yapılır. Üye Belirleme Komisyonu üç (3) kişiden oluşur:

- i. Yayın Kurulu Başkanı,
- ii. Danışma Kurulu'nun kendi içinden seçeceği bir temsilci,
- iii. EMO Yönetim Kurulu Başkanı veya Yönetim Kurulu'nun seçeceği bir temsilci.

Danışma Kurulu'nun art arda üç toplantısına mazeretsiz olarak katılmayan üyelerinin üyelikleri düşer. Ayrılan Danışma Kurulu üyelerinin yerine Üye Belirleme Komisyonu tarafından yeni üyeler seçilir.

Danışma Kurulu Üyelik İlkeleri

Madde 5 - "Üye Belirleme Komisyonu" tarafından seçilecek Danışma Kurulu üyeleri, aşağıda belirlenen ilkeler çerçevesinde belirlenir:

- a) Kendi alanlarındaki uzmanlıkları özgün bilimsel ve/veya teknolojik çalışmaları ile tanınan mühendisler TMMOB üyesi olmaları kaydıyla Danışma Kurulu üyesi olabilirler.
- b) Akademisyen olan üyelerin öğretim üyesi olmaları gerekir.
- c) Akademisyen olmayan üyelerin mesleki çalışmalarının belirli bir bölümünü Ar-Ge Merkezleri, Teknokent, Ar-Ge şirketleri veya üniversitelerdeki Araştırma Merkezlerinde geçirmiş olanlardan seçilir.

Danışma Kurulu'nun Görevleri ve Yetkileri

Madde 6 –

- Yayın Kurulu üyelerini seçer.
- Yayımlanacak makalelerin belirlenmesi için Yayın Kurulu'na önerilerde bulunur.
- Gerektiği takdirde hakemlik yapar veya hakem önerir.
- Derginin tanıtımını yapar.
- EMO Yönetim Kurulu'nun talebi halinde Yayın Organlarının faaliyetleri konusunda EMO Yönetim Kurulu'na görüş sunar, öneri ve değerlendirmede bulunur.

B. Yayın Kurulu

Madde 7 - Yayın Kurulu, öğretim üyesi olan Danışma Kurulu üyeleri arasından üç yıllık süre için seçilecek, en az 5, en çok 7 kişiden oluşur. Süresi dolan üyeler yeniden seçilebilir, ancak ardışık üç dönemden daha uzun süreli görev yapamazlar.

Yayın Kurulu Başkanı, Yayın Kurulu üyeleri tarafından kurul üyeleri arasından salt çoğunluk ile seçilir. Yayın Kurulu Başkanı üst üste en çok iki dönem görev yapabilir. Yayın Kurulu Başkanı, başkanlık görevinden ayrıldıktan sonraki dönem " Önceki Dönem Yayın Kurulu Başkanı" olarak bir dönem daha görev yapabilir.

Yayın Kurulu'nun Görevleri, Yetkileri ve Sorumlulukları

Madde 8 –

- Dergi'nin yıllık yayın sayısını belirler ve basımını gerçekleştirir. Yıllık yayın sayısı en az 2 (iki) olarak belirlenmiştir.
- Dergi'de yayımlanan makalelerin, özgün nitelikte bilimsel ve teknik araştırmalar, derlemeler, teknik notlar ve sanayi Ar-Ge projelerinin sonuçları olmasından sorumludur.
- Yayımlanmak üzere gönderilen makalelerin değerlendirilmesi için hakem seçimini ve görevlendirmesini yapar.
- "Yayın İlkeleri" ve "Yazım Kuralları"nda gerek gördüğü veya Danışma Kurulu tarafından önerilmesi halinde, değişiklik yapmak konusunda yetkilidir.
- Dergi'nin ulusal ve uluslararası alanda tanıtımını yapar.
- TÜBİTAK ve benzeri kuruluşlar tarafından düzenlenen "Sürekli Yayıncılık" ile ilgili toplantı ve seminerlere katılacak temsilcileri Yayın kurulu veya Danışma Kurulu üyeleri arasından seçer. Bu seminerlere Yayın Kurulu'nun belirleyeceği en az bir temsilci katılır.

C. Dergi Koordinatörü

Madde 9 - Dergi Koordinatörü, EMO Yönetim Kurulu tarafından belirlenir ve görevlendirilir.

Dergi Koordinatörü EMO Yönetim Kurulu'na bağlı olacak şekilde, Yayın ve Danışma Kurulları ile koordineli olarak çalışır. Aşağıdaki görevler başta olmak üzere Dergi ile ilgili tüm idari işlemlerden sorumludur:

- Yayın kurallarına uygun olan makalelerin kayıt altında tutulmasını sağlar, ve hakem raporları ile birlikte makaleleri 5 yıl süreyle saklar.
- Dergiyi baskıya hazır hale getirmekle ilgili süreci yürütür.
- Dergide yayımlanan yazıların telif hakkı Dergi'ye ait olduğundan yayına kabul edilen yazıların yazarlarından "Telif Hakkı Devri Formu" olarak 5 yıl süreyle saklar.
- Dergi'nin elektronik ortamda erişilebilirliğinin sağlanmasıyla ilgili süreci yönetir.
- Dergi hakkındaki gelen giden tüm evrakların kayıtlarını yapar ve dosyalar.

Yayın Faaliyetlerinin Sorumluluđu ve Denetimi

Madde 10 – Yayın Organları'nın tüm faaliyet giderleri EMO tarafından karşılanır. EMO Yönetim Kurulu, en az 20 gün önceden duyurarak Danışma Kurulu'nu toplantıya çağırabilir ve Yayın Organları faaliyetleri konusunda değerlendirme yapılmasını talep edebilir.

Yönerge Değişikliği

Madde 11 - Yayın Organları tarafından sunulan Yönerge değişiklik teklifleri, EMO Yönetim Kurulunca değerlendirilerek karara bağlanır.

Yürütme

Madde 12 - Bu yönerge hükümleri EMO Yönetim Kurulu tarafından yürütülür.

Yürürlük

Madde 13- Bu yönerge, EMO Yönetim Kurulu'nun 25.02.2020 tarih ve 46/88 sayılı toplantısında kabul edilerek yürürlüğe girmiştir. Yönetim Kurulu'nun 06.05.2016 tarih ve 45/06 sayılı toplantısında kabul edilen Yönerge yürürlükten kaldırılmıştır.

Yayın Organları tarafından sunulan Yönerge değişiklik teklifleri, EMO Yönetim Kurulu'nca değerlendirilerek karara bağlanır.

Geçici Madde 1 – Danışma Kurulu üyeleri, EMO Yönetim Kurulu'nun 25.02.2020 tarih ve 46/88 sayılı kararıyla ekteki şekilde belirlenmiştir.

İÇERİK-CONTENTS

Türkiye'de Yenilenebilir Enerji Uygulamaları, Mevcut Durum ve Gelecek Öngörülleri

Renewable Energy Applications in Turkey, Current Status and Future Forecasts

Ahmet Yıldız, Önder Özgener, Leyla Özgener

Makele Türü: Araştırma Makalesi

Kısa Sınavların, Ödevlerin ve Projelerin Dönem Sonu Sınavına Olan Etkilerinin Farklı Makine Öğrenmesi Teknikleri ile Araştırılması

Analysis of the Effects of Quizzes, Homeworks and Projects on Final Exam with Different Machine Learning Techniques

Karani Kardeş, H. Altay Güvenir

Makele Türü: Araştırma Makalesi

Türk Kahvesi Pişirme Süreci İçin Algılayıcı Tabanlı Bir Kontrol Yöntemi

A Sensor Based Control Method for Turkish Coffee Cooking Process

Arda Dönerkayalı, Türker Türker

Makele Türü: Araştırma Makalesi

Bir Fazlı Şebeke Etkileşimli Eviricide LCL Filtre Parametre Değerlerinin ve Seri Sönümlenme Direnç Değerinin Değişim Etkisi

Change Effect of LCL Filter Parameter Values and Series Damping Resistor Value in Single Phase Grid Connected Inverter

Akif Karafil

Makele Türü: Araştırma Makalesi

Serbest Uzak Optik Haberleşme Sistemlerinde Turbo Çarpım Kodların Performans Analizi

Performance Analysis of Turbo Product Codes on Free Space Optics Communication Systems

Mert Bayraktar

Makele Türü: Araştırma Makalesi