

Aralık'19

December'19

Sayı/Number: 2 Cilt/Volume: 9

Yıl/Year: 2019

Yayın Sahibi

TMMOB

Elektrik Mühendisleri Odası Adına

Gazi İPEK

Sorumlu Yazı İşleri Müdürü

İbrahim SARAL

Yayın İdare Merkezi

Ihlamur Sokak No:10 Kat:3

Kızılay - Ankara

Tel: (312) 425 32 72

Faks: (312) 417 38 18

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

bilimseldergi@emo.org.tr

EMO Üyelerine parasız dağıtılır

Dergi Koordinatörü

Oylum YILDIR

oylum.yildir@emo.org.tr

Sayfa Düzeni

Hakkı ÜNLÜ

hakki.unlu@emo.org.tr

Yayın Türü

Yerel Süreli Yayın

6 ayda bir yayınlanır

Basım Adedi

500

Basım Tarihi

20 Mart 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



1954

TMMOB

Elektrik Mühendisleri Odası

UCTEA/Chamber of Electrical Engineers

EMO Bilimsel Dergi Danışma Kurulu

Prof. Dr. A. Hamit Serbest	Çukurova Üniversitesi
Prof. Dr. Altay Güvenir	Bilken Üniversitesi
Prof. Dr. Cengizhan Öztürk	Boğaziçi Üniversitesi
Prof. Dr. Erhan Akın	Fırat Üniversitesi
Prof. Dr. Güven Önbilgin	Ondokuz Mayıs Üniversitesi
Prof. Dr. Murat Eyüboğlu	Orta Doğu Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Timur Aydemir	Gazi Üniversitesi
Prof. Dr. Ali Hikmet Doğru	Orta Doğu Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Arif Nacaroglu	Gaziantep Üniversitesi
Prof. Dr. Atilla Bir	İstanbul Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Aydın Köksal	Bilişim A.Ş.
Prof. Dr. Aydoğan Özdemir	İstanbul Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Ayşın 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

Aşırı Öğrenme Makinası Yöntemi ile Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorun Moment Verileri Kullanılarak Sargı İzolasyonu Arızasının Tespiti
Detection of Winding Insulation Fault by Using Moment Data of Permanent Magnet Synchronous Motor with Extreme Learning Machine Method
Ferhat Çıra
Makele Türü: Araştırma Makalesi

7

Etkileşim İçeren İzotropik Homojen Olmayan Metamalzemelerin Bünye Parametrelerinin Çıkarımı
Constitutive Parameter Extraction of Isotropic Inhomogeneous Metamaterials Involving Coupling
Uğur Cem Hasar, Mehmet Ertugrul, Hamdullah Öztürk
Makele Türü: Araştırma Makalesi

17

İstanbul Teknik Üniversitesi'nde Gençlerle Mühendislik Kültürü Üzerine Bir Sohbet
A Talk at Istanbul Technical University with Young on Engineering Culture
Mithat İdemem
Makele Türü: Temalı Derleme Makale

23

Düzce Çevresi Su Temini Uygulamalarında Kullanılacak 15 kWp Fotovoltaik Sistemin Fayda-Maliyet Analizi
Cost-Benefit Analysis of 15 kWp Photovoltaic System for Water Supply Application in DUZCE Region
Ali Yıldız, Emin Yıldırım
Makele Türü: Araştırma Makalesi

33

Aşırı Öğrenme Makinası Yöntemi ile Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorun Moment Verileri Kullanılarak Sargı İzolasyonu Arızasının Tespiti

Detection of Winding Insulation Fault by Using Moment Data of Permanent Magnet Synchronous Motor with Extreme Learning Machine Method

Ferhat ÇIRA^{1*} 

Dicle Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Diyarbakır, Türkiye
fcira@dicle.edu.tr

Öz

Elektrik makinalarının arızalarının erken tespitinin yapılmaması, felaketle sonuçlanabilecek arızalara neden olduğu bilinmektedir. Endüstride en çok kullanılan motorların asenkron motorlar olması sebebiyle durum izleme ve arıza tespiti bu makinalar üzerine yoğunlaşmıştır. Oysa hassas hız ve konum kontrolü gerektiren uygulamalarda sürekli mıknatıslı motorların (SMSM) kullanılmaya başlanmasıyla birçok araştırmacı bu motorların arıza tespiti çalışmaları yaygınlaştı. SMSM'lerin hassas hız ve konum kontrolü kabiliyetleri tamamen sağlıklı çalışmalarına bağlıdır. En küçük bir arıza sonucu bu hassasiyet kaybolabileceğinden bu tür motorlarda arızanın erkenden tespit ve teşhis edilebilmesi çok önemlidir. Bu çalışmada SMSM'lerde sıkça meydana gelen stator izolasyon arızasının erken evrede arıza tespiti için bir boyutlu yerel ikili desenler (1b-YİÖ) tabanlı öznelik çıkarım yöntemi kullanılmıştır. Bu amaçla sağlıklı ve farklı kısa devre arıza oranlarına sahip SMSM'lerden labview programı tabanlı veri toplama kartı ile moment verileri alınmıştır. Sağlıklı ve arızalı motorlardan alınan moment işaretlerine 1b-YİÖ uygulanmış ve histogramları elde edilmiştir. Elde edilen histogramlar ile sağlıklı ve arızalı motorların öznelikleri oluşturularak aşırı öğrenme makinesi (AÖM) yöntemi ile işaretler sınıflandırılmıştır. Arızanın tespitinin erken evrede yapılabilmesi için önerilen bu yaklaşım ile oldukça büyük bir başarı sağlandığı görülmüştür. Bu amaçla üretilen farklı arıza şiddetine sahip motorların farklı hız ve yüklenme koşulları altında yapılan deneyler ile yöntemin başarısı doğrulanmıştır. Böylece daha önce literatürde olmayan bir yöntem ile SMSM'nin stator izolasyon arızasının tespiti yüksek güvenilirlikli ve başarıyla yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Tek boyutlu İkili örüntü yöntemi; Öznelik çıkarım; Arıza tespiti; Sınıflandırma;

Abstract

Failure in early detection of faults of electrical machines is known to cause catastrophic malfunction. As induction motors are most common motors in industry, condition monitoring and fault detection are concentrated on these machines. However, with the use of permanent magnet synchronous motors (PMSM) in applications requiring precise speed and position control, many researchers have studied the fault detection of motors. The precise speed and position control capabilities of the PMSMs totally depend on their healthy operation. Since this precision can be lost due to the slightest failure, it is very important to detect and diagnose the fault early on such motors. In this study, a feature extraction method based on one dimensional local binary pattern (1D-LBP) method which is a distinctive method, has been used for feature extraction. It has been proposed for fault detection of early stage stator insulation fault occurring frequently in PMSMs. In this study, torque data were obtained from PMSMs with healthy and different short circuit fault rates. 1b-YİÖ was applied to these data, and the histograms of torque signals were obtained. Healthy and faulty motors could be classified at high success rates applying one of the extreme learning machine (ELM) technique, to histograms. Using these features, ELM method is used to classify the signals. It has been observed that great success has been achieved with this approach in order to detect the fault in an early stage. The success of the method has been confirmed by experiments performed under different speed and loading conditions of motors with different fault severities.

Keywords: Permanent Magnet Synchronous Machine, Local Binary Pattern, Texture Analysis, Fault Detection.

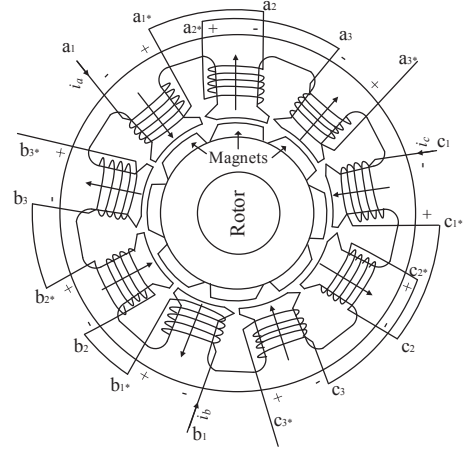
1. Giriş

Yolcu güvenliğinin ön planda olduğu havataşıtlarında itme ve diğer güvenlik tertibatının kontrolünü sağlayan elektrik motorlarında olası bir arızanın erken tespit edilmesi hayati derecede önemlidir. Benzer şekilde endüstriyel bir üretim tesisinde örneğin bir nükleer santralde hayati bir kontrol mekanizmasının motor arızası kaynaklı çalışmaması çok büyük felaketlere çok açabilmektedir. Bu nedenle, felakete ilgili arıza riskini en aza indirmek ve güvenilir operasyonlar için erken arıza teşhisinin yapılması önemlidir.

Havacılık ve uzay sanayi, endüstri ve silah sistemlerinde Sürekli mıknatıslı motorlar (SMSM) son yıllarda pazar payına hakim duruma gelmiştir. Özellikle hassas kontrol gerektiren uygulamalardaki kararlılığı ve verimliliği nedeniyle tercih edilmektedir [1]–[3]. Ayrıca, yüksek güç / tork yoğunluğuna sahip olan bu motorlar, yüksek mekanik, ısı ve elektriksel gerilimlere maruz kalmaktadırlar. Bu da arızalara daha yatkın hale gelmesine neden olmaktadır. Özellikle, SMSM’de sarğı yalıtımının bozulması ile ilgili arızaların teşhisi, anahtarlama frekansı ve sarğı iletkenlerinin termal stresi arttıkça daha fazla önem kazanmaktadır [4].

SMSM’leri yapısal olarak diğer motorlardan ayırt eden en önemli farkı rotorlarındaki mıknatıslardır [5]. Şekil-1’de bir SMSM’nin iç yapısının şematik gösterimi görülmektedir. SMSM’lerin hassas çalışması sağlıklı çalışmalarına bağlıdır. Arızalı bir SMSM ‘nin çalışma hassasiyeti beklenenden düşüktür. Bunun yanı sıra henüz başlangıç aşamasındaki arızanın tespit edilememesi durumunda çok büyük zararlara yol açtığı bilinmektedir. Çok küçük bir stator sarğı izolasyonu arızası yayılarak kısa zamanda tüm motoru etkileyeceğinden, erkenden tespit edilmesi oldukça önemlidir. Elektrik motorlarının arıza tespiti için önerilen birçok öznelik çıkarma yöntemi mevcuttur. Bu yöntemlerden birçoğu akım, gerilim, titreşim, moment ve sıcaklık gibi motor parametrelerine dayalı olarak geliştirilmiştir. En kolay ve maliyeti en düşük yoldan elde edilebilen motor sinyalleri işlenerek yapılan ve başarıya ulaşan arıza tespit yöntemleri endüstride kullanılabilirliği daha yüksek olması nedeniyle tercih edilmektedir [6]–[10].

Bu yöntemler motorlardan elde edilen bahsedilen parametreleri sinyal işleme yöntemleri kullanılarak karakteristik özelliklerinin çıkarılması esasına dayanmaktadır. Böylece arızalı ve sağlıklı motorları birbirinden ayırt edebilecek sinyal karakteristikleri elde edilmektedir [11]. Öznelikler çıkarılırken uygulanan yöntemin başarısı motorun sağlıklı veya arızalı olduğunun tespitinin başarısıyla ölçülmektedir. Bu amaçla yapılan çalışmalarda sinyallerin farklı işleme tekniklerinden yararlanılmıştır. Elektrik motorlarının stator kısa devre arızalarının erken evrede tespitinin yapılmaması, telafisi mümkün olmayan zararlara yol açabilmektedir [12]–[14].



Şekil 1. SMSM'nin stator ve rotor modeli

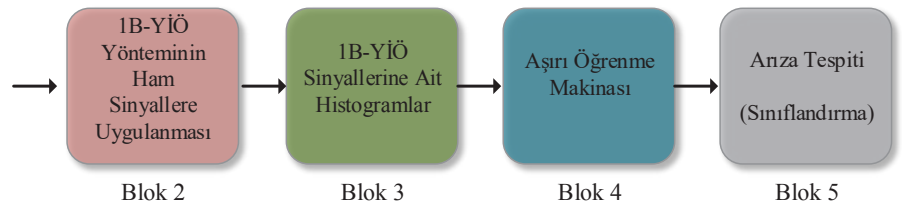
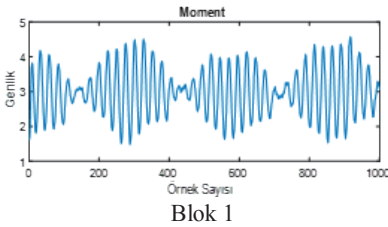
İlk stator arıza tespit çalışmaları 1980'lerde indüksiyon motorlar (IM) ve senkron makineleri (SMs) üzerinde yapıldı. Geniş çapta yapılan bir motor güvenilirlik anketinin sonucu, IM'lerde arızaya sebebiyet veren nedenlerinin % 30'undan ve SM'lerde arıza başlatıcıların % 40'ından fazlasının stator arızası ile ilişkili olduğunu göstermektedir [15]. SMSM'lerin kullanım alanı genişledikçe, arıza tespiti çalışmaları da artmaktadır. Bu alandaki kapsamlı çalışmalardan biri Gandhi ve ark. [16] tarafından 2011 yılında, SMSM'lerde stator kısa devre arızasının teşhisi ve modellenmesi özetlenmiştir. Ayrıca, Hamiti ve ark. [17] ve Arumugam ve ark. [18] SMSM için kısa devre arıza tespit yöntemlerini incelemiştir. SMSM'nin stator izolasyon arızasının erken evrede tespitinin yapılmasının zorluğu birçok araştırmacının ilgisini çekmektedir.

Vektör kontrollü SMSM'ler bir dq-ekseni çerçevesi ile senkronize olduğundan ve normal olarak bir SMSM'yi kontrol etmek için kullanıldığından q-ekseni akımının ikinci harmoniğinin değişimi bu şekilde kolayca izlenebilir [19], [20]. Basit frekans spektrum analizine dayalı arıza tespit teknikleri ile arıza tespiti [21] ve [22]'de yapılmıştır. Stator kısa devre arızasının zamana göre değişen imzasını durağan olmayan ve dinamik bir durumda değerlendirmek için, stator kısa devre arızası tespiti için frekans-zaman analizi yöntemleri önerilmiştir. Bu yöntemlerde, stator akım sinyali frekans-zaman dilimlerine ayrıştırılır ve farklı dönüşüm yaklaşımları kullanarak hatanın imzalarını oluşturur. Kısa süreli Fourier dönüşümü (STFT), WT, Hilbert Huang dönüşümü (HT), Gabor spektrogramı ve Cohen-sınıf ikinci dereceden dağılımları, endüstriyel olmayan uygulamalarda arızalı makine analizi için en yaygın kullanılan yöntemlerdir. STFT, sinüzoidal frekansı ve zaman içinde değişen bir sinyalin yerel bir seçiminin faz bileşenlerini belirlemek için kullanılan güçlü bir araçtır. Stator kısa devre arızasının neden olduğu arıza harmonik bileşenlerini ortaya çıkarmak (belirlemek) için, [23]'de STFT uygulanmıştır. STFT'nin hesaplama açısından daha karmaşık olduğu ve normalde işlemden önce seçilen sabit pencere işlevi nedeniyle esneklikten yoksun olduğu görülüyor. Sabit pencere fonksiyonu, çalışma sırasındaki hız ve yükteki her türlü değişimi yakalamaz. Bu sorunun üstesinden gelmek için, geniş bantlı ve durağan olmayan sinyalleri sabit durumlu bir zaman-frekans domeni ve zaman domenine bölme kabiliyetine sahip olan farklı bir zaman-frekans dağıtım metodu (WT) uygulanabilir [23]–[25].

Stator kısa devre arızasının tespiti için gerilim sinyallerinin ölçülmesine dayalı birkaç teknik önerilmiştir. Gerilim analizine dayalı arıza tespit yaklaşımlarının çoğu, stator akımı ve gerilimindeki düşük ve yüksek dereceli harmoniklerin izlenmesine bağlıdır. Bununla birlikte, bu harmoniklerin genliği, sürücünün geri besleme döngüleri, değişken yük ve hız gibi çeşitli faktörlerden etkilenebilir.

Gerilim sıfır bileşenleri (ZSVC'ler), stator kısa devre arızasını tespit etmek için kullanılabilir [26]–[28]. ZSVC tabanlı yöntem arıza tespit yöntemi makine tahrikinin etkisinden bağımsız olduğundan etkili olabilmektedir. Ancak, motor stator sargılarının nötr noktasına erişim gereklidir. ZSVC tabanlı arıza teşhis yaklaşımı, arızaya dayanıklı sürücü sistemleri (fault tolerant schemes) için çekici bir çözümdür. Arızaya dayanıklı invertörler normalde bir arıza durumunda, motorun nötr noktasına bağlı olan dördüncü bir invertör bacağı kullanır [29]. [30]'da, ZSVC, FFT ve HHT kullanılarak hem geçici hem de sürekli durum koşullarında incelenmiştir ve temel harmoniğinin, yıldız bağlantılı bir SMSM'de stator kısa devre arızasının bir göstergesi (imzası) olarak kullanılabilirliği sonucuna varılmıştır. Değişken hızda ve yükte motorun tüm çalışma bölgesi üzerindeki bu harmoniği izlemek için Vold-Kalman filtreleme sırası takibi (VKF-OT) uygulanmıştır [30].

Özellikle akım, gerilim, moment, titreşim, moment ve gürültü gibi elektriksel sinyallerden öznitelikler çıkarılarak yapılan arıza tespiti üzerine yapılan çalışmalarda Fast Fourier Transform (FFT) [31], [32], Wavelet Transform (WT) [33], Wigner-Ville distribution (WVD) [34], [35], Principle component analysis (PCA) [36], Zero-sequence voltage component (ZSVC) [10], Hilbert-Huang transform (HHT) [37]–[39] gibi çok sayıda öznitelik çıkarma tekniklerinden yararlanılmıştır. [40]'de SMSM stator kısa devre arızası PWM ripple yöntemi kullanılmıştır. Ayrıca moment verilerini kayıt edebilmek için kullanılan sensörlerin maliyetleri dikkate alındığında, bu verilerle arıza tespitinin daha az maliyetli olduğu ortaya çıkmaktadır. Bu çalışmada yalnızca moment verileri kullanılarak yeni bir arıza tespit yöntemi önerilmektedir. Daha önceki çalışmalarda motor arıza tespitinde kullanılmayan yeni bir yöntem olan 1b-YİÖ yöntemi ile arıza tespitinin büyük bir doğruluk yüzdesi ile tespiti sunulmaktadır. Bu yöntemin diğer yöntemlerden en önemli avantajı moment sinyallerinin frekans spektrumuna dönüştürülmeden doğrudan zaman bölgesinde analiz edilmesi ve karakteristik özniteliklerinin çıkarılmasına dayanmaktadır. Böylece fazladan dönüşümler uygulanmadığından ön işleme karmaşıklığının önüne geçilmiş ve daha hızlı sonuç alınması sağlanmıştır. Elde edilen karakteristik öznitelikler, makine öğrenmesi metodlarından AÖM algoritması ile eğitilmiş ve yüksek bir başarıyla arızanın tespitinin yapılabildiği gösterilmiştir.



Şekil 2. Çalışma Diyagramı

2. Materyal ve Yöntem

2.1. Önerilen Yöntem Ve Deneysel Düzenek

Bu bölümde sürekli mıknatıslı senkron motorda meydana gelen stator kısa devre arızası deney düzeneğinin nasıl oluşturulduğu, hangi bileşenlerden oluştuğu, motorun moment verilerinin nasıl elde edildiği, arıza tespiti için önerilen yöntem ve çalışma diyagramı anlatılmaktadır.

2.2. Çalışma Diyagramı

Bu çalışmada SMSM'lerin statorlarında meydana gelen sargı kısa devre arızalarının tespiti için, literatürde geleneksel öznitelik çıkarım teknikleri olan frekans spektrum analizi veya zaman frekans analizi ve Motor akım imza analizi (MCSA) yöntemleri yerine bu motor ve arıza türü için özgün bir yöntem olan 1b-YİÖ metodu öznitelik çıkarmada kullanılmıştır. Önerilen yöntem moment işaretleri üzerindeki her değer komşuları arasındaki karşılaştırmalar sonucu elde edilen yeni işaretlerin histogramını kullanan istatistiksel bir yaklaşımdır. Sağlıklı ve arızalı SMSM'lerin tespiti için önerilen yaklaşıma ait blok diyagram Şekil 2'de verilmiştir. Her aşamada gerçekleştirilen işlemler özetlenmiştir.

Blok 1: Farklı şartlarda alınan sağlıklı ve arızalı motorlara ait ham sinyallerdir.

Blok 2: Bu evrede ham sinyallere 1b-YİÖ dönüşümü uygulanmıştır. Dönüşüm sonucunda 0-63 değerleri arasında değişen öznitelikler elde edilmiştir. Bu özniteliklerden elde edilen sinyale ise 1b-YİÖ sinyali adı verilmektedir. Bu sinyal analiz edildiğinde ham sinyale oranla daha anlamlı bir veri elde edildiği görülmektedir. Çünkü karışık ve uç değerlere sahip olan ham sinyal belirli bir aralığa indirgenmiş olur ve işaretlerin ayrıştırılması daha belirgin hale gelmiş olur.

Blok 3: Bu aşamada, her bir değer için sinyal içerisinde ne sıklıkla görüldüğünü belirleyen, 1b-YİÖ sinyalinin histogramları elde edilmiştir. Histograma ait değerlerin her biri, bir özniteliği ifade etmektedir. Bu çalışmada $P=6$ değerini aldığından, sınıflandırma yöntemleri için toplam 64 öznitelik kullanılmıştır.

Blok 4: Sağlıklı ve arızalı motorlara ait sinyallerin 1b-YİÖ işaretlerini birbirinden ayırtmak için aşırı öğrenme makinası (AÖM) yöntemi kullanılmıştır. Sınıflandırma işlemi; 10-katlı çapraz doğrulama yöntemine göre gerçekleştirilmiştir.

Blok 5: Arıza tespit sonuçları tablolarda verilmiştir.

2.3. Bir Boyutlu Yerel İkili Örüntüler

Yerel ikili örüntü, parametrik olmayan bir operatördür. YİÖ kodu bir örnek ve komşuları arasındaki farklılıkları kullanarak verileri açıklayabilir [41], [42]. YİÖ'ler özellikle yüz tanıma sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır [42], [43]. Sabit bir piksel konumunda, YİÖ operatörü, merkez piksel ile komşu pikseller arasındaki piksel yoğunluklarının düzenli bir ikili karşılaştırmalar kümesi olarak tanımlanmaktadır. Bununla birlikte, görüntüler için kullanılan YİÖ'ler, piksel komşusunu 2b-YİÖ olarak adlandırılan iki boyutta kullanır. Yaygın olarak kullanılmamasına rağmen, 1b-YİÖ, 2b-YİÖ'ye benzer özellikler sağlayabilir. Örneğin, [44] 'de N.Chatlani ve ark., konuşma sinyalinin belirli özelliklerinin ayırt edici bir özelliğini belirlemiştir; burada 1b-YİÖ özellikleri, seslendirilmemiş ve seslendirilmiş ses sinyallerini ayırt edebilmiştir. Ek olarak, [45]'de Q. Zhu ve ark. konuşma sinyalinin Voice Active Detection'ı (VAD) bölümlenmek ve ayırmak için 1b-YİÖ'yi kullanmışlardır.

1b-YİÖ operatörü, titreşim sinyalinin her bir değerini mahallelerini dikkate alarak ve merkez pozisyonunu değerini mahalleler için bir eşik olarak kullanarak etiketler. Komşu değeri merkez değerden düşükse, komşunun değeri 0 olur; aksi takdirde 1'e döner. Bir komşuluk için yerel bir ikili şablon kodu üretilir. YİÖ ikili kodunun ondalık değeri, sabit değerlerin etrafındaki yerel yapısal bilgiyi sunar [41].

Bu çalışmada, motor arıza işaretleri ilgili önemli bilgileri yakalayabilmek için özellik çıkarma yöntemi olarak 1b-YİÖ kullanılmıştır. 1b-YİÖ metodu, görüntü işlemede öznelik çıkarımında sıkça kullanılan bir yöntem olan YİÖ'den geliştirilmiştir, yapısal ve işleyiş yönünden YİÖ ile benzerlik göstermektedir. YİÖ operatörü iki boyutlu görüntüler için kullanılmaktadır. Ancak 1b-YİÖ metodu, zaman serisi şeklindeki bir boyutlu dizilimi olan sinyaller için veri işlemede farklı uygulama alanlarında kullanılmak üzere geliştirilmiştir [44]. İşaret üzerindeki merkez değer olarak belirlenen her bir değer, belirlenen komşu değerleri ile ikili karşılaştırmalar yapılarak ikili kodlar elde edilir. Bu işlem, tüm sinyal boyunca tekrarlanır. Bu ikili kodların onluk karşılıklarından elde edilen değerler 1b-YİÖ sinyalini oluşturmaktadır.

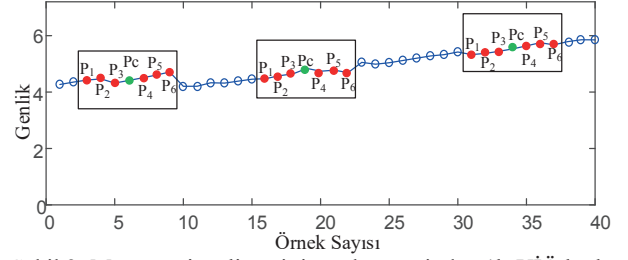
İkili karşılaştırmaların matematiksel formülü aşağıdaki gibidir. Burada $x[i]$: sinyali, P: Komşu sayısını, $f(x)$: İkili sistemdeki sayıyı gösterir.

$$LBP_p(x[i]) = \sum_{r=0}^{(P/2)-1} \left\{ f \left[x \left[i + r - \frac{P}{2} \right] - x[i] \right] 2^r \right\}$$

$$f = \begin{cases} 1, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases} \quad (1)$$

1b-YİÖ metodu öznelik çıkarma yöntemi adım adım örnek sinyalinin bir bölümü üzerinde açıklanmıştır. Şekil 3'te 1b-YİÖ

metodunu uygulamak için sinyalden alınan merkez nokta ve komşulukları göstermektedir.



Şekil 3. Moment sinyaline ait işaretler üzerinden 1b-YİÖ kodu hesaplama

1b-YİÖ kodun hesaplanması için gereken aşamalar aşağıdaki gibidir.

Birinci aşamada; Verilen bu sinyalde 1b-YİÖ operatörü merkez değer ile komşu değerleri arasındaki ikili karşılaştırmalar sonucu elde edilmektedir. Sinyal üzerindeki her bir değer için öncesinden ve sonrasında toplamda P adet komşu değer seçilir. Öncesinden P/2 ve sonrasında P/2 komşu alınmaktadır. Bu çalışmada P=6 için 6 tane komşu nokta belirlenmiştir. Her bir nokta merkez değer (Pc) olarak alındığında merkez değeri (Pc) den önce (P1, P2, P3) ve sonra (P4, P5, P6) yer almaktadır. Yukarıdaki sinyal üzerindeki bir bölüm aşağıdaki gibi gösterilip sinyal üzerinde Pc ve Pi değerleri gösterilmiştir.

P1	P2	P3	Pc	P4	P5	P6
4.5	4.7	4.4	4.5	4.7	4.8	4.9

Şekil 4. Sinyal üzerindeki örnek değerler

İkinci aşamada; Şekil 4'te belirtilen P = {P1, P2, P3, P4, P5, P6} değerleri Pc değeri ile karşılaştırılarak ikili değerler elde edilmektedir. Komşu Pi değeri merkezi değerden büyük veya eşitse bir(1), aksi takdirde sıfır(0) değerini alır. (Şekil 5).

P1	P2	P3	Pc	P4	P5	P6
1	1	0	4.5	1	1	1

Şekil 5. Pc ve Pi komşu değerlerinin karşılaştırılması (Denklem 1'in uygulanması)

Üçüncü aşamada; Karşılaştırmalarda merkez değerler için ikili YİÖ kodlar meydana gelir. Bu ikili kodlar ondalık değeri verilen Pc noktalarının çevresindeki yerel yapı bilgisini temsil eder. Daha sonra elde edilen bu ikili dizge ondalık değere dönüştürülür. Şekil 6'dan görüldüğü gibi merkez değerinin ilk değeri 4.5 iken 1b-YİÖ dönüşümünden sonra yeni değeri 59 olarak elde edilmiştir.

P1	P2	P3	Pc	P4	P5	P6
4.5	4.7	4.4	4.5	4.7	4.8	4.9
P1	P2	P3	Pc	P4	P5	P6
1	1	0	4.5	1	1	1

$$(110111)_2=59$$

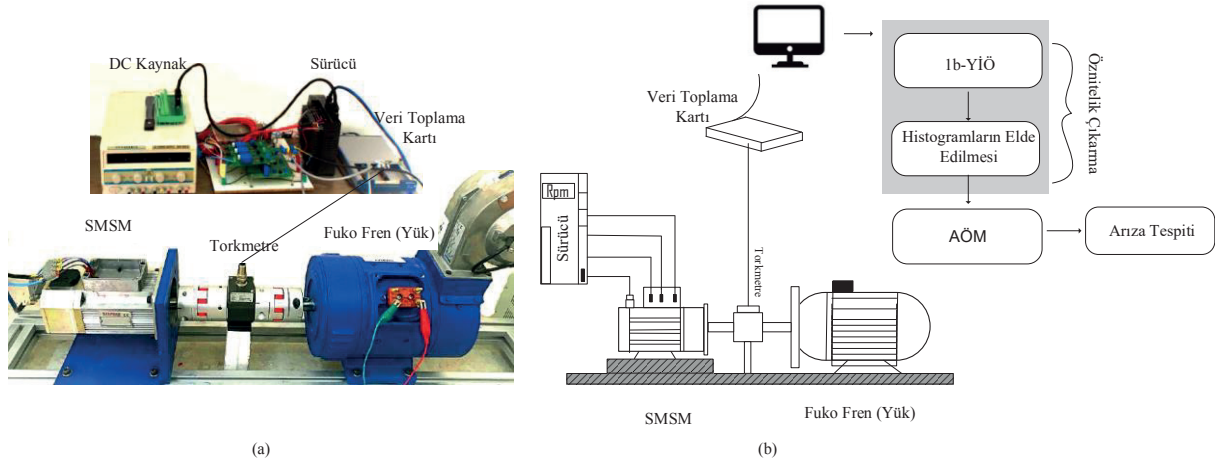
Şekil 6. Sinyalden elde edilmiş olan 1b-YİÖ kodu

Dördüncü aşamada yukarıdaki adımlar tek tek sinyal üzerindeki tüm değerler için gerçekleştirilir. Uygulanan bu yöntem ile işaretlerden 0-64 aralığında değerlere sahip 1b-YİÖ sinyali elde edilmiş olur. Diğer bir deyişle 1b-YİÖ sinyali 0-64 aralığındaki değerlerden oluşmaktadır. Elde edilen her bir değer frekansı; bir örüntünün ifadesidir. 1b-YİÖ işaretlerine ait histogram makine öğrenmesi yöntemleri için öznitelik vektörü olarak kullanılmaktadır. 1b-YİÖ yönteminin en önemli özelliği işaretlerdeki en küçük değişimlerine karşı yüksek hassasiyet ve hesaplama kolaylığıdır. 1b-YİÖ işaretleri elde edildikten sonra bu işaretlerin histogramları öznitelik olarak kullanılmaktadır. Elde edilen histogramlar makine öğrenmesi ile sınıflandırma işlemi gerçekleştirilmektedir.

2.4. Deneysel Düzeneğin Kurulması

Evirici beslemeli SMSM'nin farklı hız, yüklenme ve arıza şiddeti koşullarındaki, karakteristik arıza imzasını tanımlamak

amacıyla bazı deneyler yapılmıştır. Sağlıklı ve farklı arıza oranlarına sahip birbirine özdeş 1,2 kW gücünde her bir fazında 200 sarım bulunan SMSM'lerden 800 rpm-2000 rpm hız aralığında ve %0 (Yüksüz)-%100 (tam yük) yüklenme oranlarında her durum için moment sinyalleri 10 kHz örnekleme ile 12 saniye süresince kayıt altına alınmıştır. Yüklenme oranını ayarlamak amacıyla DC gerilimle çalışan Fuko freni kullanılmıştır. SMSM ile fuko freni milleri arasında yerleştirilen Drbk-10 serisi hassas torkmetre ile anlık olarak moment sinyalleri NI 6343 usb model DAQ kartı ile bilgisayara kayıt edilmiştir. SMSM ile fuko frenin birbirine bağlanmasında mekanik kayıpları ve küçük eksentrik arızalarını önlemek amacıyla fleksible kaplinler kullanılmıştır. Böylece hem sağlıklı hem de stator sargılarının tek fazında oluşturulan 2 sarım, 4 sarım ve 8 sarımlık 3 farklı kısa devre arıza şiddetine sahip SMSM'lerden arıza şiddetlerinin etkisiyle oluşan moment sinyalleri kayıt edilmiştir. (şekil 7)



Şekil 7. Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor Stator Kısa Devre Arızası a-) Test düzeneği b-) Şematik gösterimi

2.5. Aşırı Öğrenme Makinası Algoritması

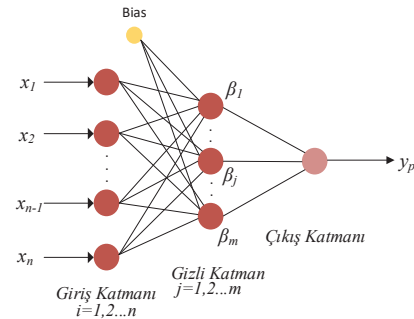
AÖM tek bir gizli katmana sahip ileri beslemeli yapay sinir ağlarını eğitmek için önerilmiş bir yöntemdir [46], [47]. Tek gizli katmanlı YSA'nın yapısı Şekil 8'de verilmiştir.

Şekil 8'de gösterilen yapay sinir ağının çıkışı:

$$y_p = \sum_{j=1}^m \beta_j \cdot g \left(\sum_{i=1}^n w_{i,j} x_i + b_j \right) \quad (2)$$

ile hesaplanmaktadır. Burada $x_{1..n}$ giriş vektörlerini, $y_{1..p}$ çıkış vektörlerini, $\beta_{1..m}$ çıkış katmanı ağırlıklarını, $w_{1..m}$ giriş katmanı ile gizli katman arasındaki bağlantı ağırlıklarını, $b_{1..m}$ eşik değerlerini ve $g(\cdot)$ ise aktivasyon fonksiyonunu göstermektedir [48]. YSA'nın başarısı ağırlıklar, eşik değerleri ve transfer fonksiyonu modellenecek sistemin karakterine en uygun şekilde seçimiyle mümkündür.

Geri yayımlı öğrenme algoritması gibi gradyan temelli öğrenme yaklaşımlarında ağırlıklar ve eşik değerlerinin tamamı iteratif olarak en uygun değeri alıncaya kadar değiştirilmektedir. Bu sebeple genel olarak yavaş ve yerel minimumlar nedeniyle eğitim hata oranı yüksek değerler alabilmektedir. AÖM'de ise giriş katmanı ağırlıkları ve eşik değerleri rastgele atanmakta ve çıkış ağırlık değerleri buna bağlı olarak hesaplanmaktadır [47], [49].



Şekil 8. Aşırı Öğrenme Makinası Ağ Yapısı

3. Sonuçlar ve Tartışma

Bu çalışmada sabit mıknatıslı senkron motorlardan farklı hız ve yük koşulları altında sağlıklı ve farklı kısa devre oranına sahip arızalı motorlardan elde edilen 10 kHz'lik örnekleme ile 12 saniye süresince kayıt altına alınan moment sinyallerinden motorun arızalı mı yoksa sağlıklı mı olduğunu belirleyebilmek için yeni bir öznitelik çıkarım ve arıza tespit yaklaşımı önerilmiştir

Burada SMSM'nin farklı hız ve farklı yük koşullarında çalışırken kayıt altına alınan moment işaretlerine 1b-YİÖ yöntemi uygulanarak elde edilen özniteliklerin arıza tespitinde

nasıl bir sonuç verdiğini görmek amacıyla AÖM algoritması eğitilmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda tablolar halinde gösterilmektedir.

Farklı arıza şiddeti oranları için ayrı ayrı hazırlanan tablolarda her işaret için arıza tespit başarı yüzdesi gösterilmektedir. Stator kısa devre arıza tespitinin yüke, hız ve arıza şiddetine bağlı değişimini göstermek amacıyla Tablo-1, Tablo-2 ve Tablo-3 oluşturulmuştur. Tablo-1’de kısa devre arıza şiddeti en düşük boyuttaki tek fazında 2 sarım kısa devre edilen SMSM’nin moment verileri ile yapılan arıza tespit başarı yüzdesine bakıldığında, arıza tespit başarısının motor dönüş hızı ile doğru orantılı, yüklenme ile ters orantılı olduğu görülmektedir.

Tablo- 1. Arıza şiddeti 2 Sarım Kısa Devreli Motorun arıza tespit başarı yüzdesi

Rpm →	800	1200	1600	2000	Ort. Başarı (%)
%0 yüklü	93.33	96.66	100	100	97.50
%25 yüklü	80	88	100	100	92.00
%50 yüklü	76.67	93.33	96.66	100	91.67
%75 yüklü	76.67	93.33	96.66	100	91.67
%100 yüklü	76.67	93.33	93.33	100	90.80
Ort. Başarı (%)	80.67	92.93	97.33	100	92.73

Dolayısıyla düşük hızlı çalışma koşullarında daha az yüklenme ile arızanın daha kolay tespit edildiği görülmektedir. Aynı şekilde kısa devre arıza şiddeti arttığında tablo-2’den arıza tespit başarı yüzdesinin genel ortalamasının yükseldiği görülmektedir.

Tablo- 2. Arıza şiddeti 4 Sarım Kısa Devreli Motorun arıza tespit başarı yüzdesi

Rpm →	800	1200	1600	2000	Ort. Başarı (%)
%0 yüklü	93.33	100	100	100	98.33
%25 yüklü	93.33	100	100	100	98.33
%50 yüklü	88	96.66	100	100	96.17
%75 yüklü	88	96.66	100	100	96.17
%100 yüklü	86	96.66	100	100	95.67
Ort. Başarı (%)	89.73	98	100	100	96.93

Böylece 2 sarım kısa devreli SMSM’nin arıza tespitinin tüm yük ve hız koşullarının ortalaması alındığında başarı %92.73 iken arıza şiddetinin 4 sarımın kısa devre olduğu durumda beklendiği gibi ortalama arıza tespit başarısının %96.93’e çıktığı görülmektedir. Arıza şiddetini daha da arttırıp 8 sarım kısa devre edildiği durumun sonuçları tablo-3’de verilmiştir. Tablo-3’den arıza şiddetinin yüksek olduğu durumda tüm yük ve hız koşullarının ortalama arıza tespit başarısının %98.5’e yükselmesi yöntemin doğru çalıştığını net biçimde göstermektedir.

Tablo-3. Arıza şiddeti 8 Sarım Kısa Devreli Motorun arıza tespit başarı yüzdesi

Rpm →	800	1200	1600	2000	Ort. Başarı (%)
%0 yüklü	96.66	100	100	100	99.17
%25 yüklü	96.66	100	100	100	99.17
%50 yüklü	96.66	100	100	100	99.17
%75 yüklü	93.33	96.66	100	100	97.50
%100 yüklü	93.33	96.66	100	100	97.50
Ort. Başarı (%)	95.33	98.66	100	100	98.50

Beklendiği gibi arıza şiddeti düşük olan motor verilerinden yapılan arıza tespit yüzdesi arıza şiddeti yüksek olanla kıyaslandığında daha düşük çıkmaktadır. Böylece SMSM’nin stator sargı yalıtım arızalarının tespitinde 1b-YİÖ yönteminin başarılı ve güvenilir sonuçlar verdiği görülmüştür.

Kaynaklar

- [1] Z. Q. Zhu and D. Howe, “Electrical Machines and Drives for Electric, Hybrid, and Fuel Cell Vehicles,” *Proc. IEEE*, vol. 95, no. 4, pp. 746–765, Apr. 2007.
- [2] Z. Yang, F. Shang, I. P. Brown, and M. Krishnamurthy, “Comparative Study of Interior Permanent Magnet, Induction, and Switched Reluctance Motor Drives for EV and HEV Applications,” *IEEE Trans. Transp. Electrification*, vol. 1, no. 3, pp. 245–254, Oct. 2015.
- [3] E. Bostanci, M. Moallem, A. Parsapour, and B. Fahimi, “Opportunities and Challenges of Switched Reluctance Motor Drives for Electric Propulsion: A Comparative Study,” *IEEE Trans. Transp. Electrification*, vol. 3, no. 1, pp. 58–75, Mar. 2017.
- [4] M. Zafarani, E. Bostanci, Y. Qi, T. Goktas, and B. Akin, “Interturn Short-Circuit Faults in Permanent Magnet Synchronous Machines: An Extended Review and Comprehensive Analysis,” *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.*, vol. 6, no. 4, pp. 2173–2191, Dec. 2018.
- [5] F. Çıra, “Automatic determination of stator short circuit fault and fault severity of permanent magnet synchronous motor,” Inonu University, 2017.
- [6] B. L. Rajalakshmi Samaga and K. P. Vittal, “Comprehensive study of mixed eccentricity fault diagnosis in induction motors using signature analysis,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 35, no. 1, pp. 180–185, Feb. 2012.
- [7] B. M. Ebrahimi, J. Faiz, S. Lotfi-fard, and P. Pillay, “Novel indices for broken rotor bars fault diagnosis in induction motors using wavelet transform,” *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 30, pp. 131–145, Jul. 2012.
- [8] A. Soualhi, G. Clerc, and H. Razik, “Detection and Diagnosis of Faults in Induction Motor Using an Improved Artificial Ant Clustering Technique,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 9, pp. 4053–4062,

Sep. 2013.

- [9] Y. Nyanteh, C. Edrington, S. Srivastava, and D. Cartes, "Application of Artificial Intelligence to Real-Time Fault Detection in Permanent-Magnet Synchronous Machines," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 49, no. 3, pp. 1205–1214, 2013.
- [10] J. C. Urresty, J. R. Riba, and L. Romeral, "A back-emf based method to detect magnet failures in PMSMs," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 49, no. 1, pp. 591–598, 2013.
- [11] F. Cira, M. Arkan, B. Gumus, and T. Goktas, "Analysis of stator inter-turn short-circuit fault signatures for inverter-fed permanent magnet synchronous motors," in *IECON 2016 - 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2016, pp. 1453–1457.
- [12] A. Sarikhani and O. A. Mohammed, "Inter-turn fault detection in PM synchronous machines by physics-based EMF estimation," in *2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2012, pp. 1254–1261.
- [13] J. Ahmed Farooq, T. Raminosoa, A. Djerdir, and A. Miraoui, "Modelling and simulation of stator winding inter-turn faults in permanent magnet synchronous motors," *COMPEL - Int. J. Comput. Math. Electr. Electron. Eng.*, vol. 27, no. 4, pp. 887–896, 2008.
- [14] M. Hadeif, M. R. Mekideche, and A. Djerdir, "Vector controlled Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM) drive with stator turn fault," in *19th International Conference on Electrical Machines, ICEM 2010*, 2010.
- [15] "Report of Large Motor Reliability Survey of Industrial and Commercial Installations, Part II," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. IA-21, no. 4, pp. 865–872, 1985.
- [16] A. Gandhi, T. Corrigan, and L. Parsa, "Recent Advances in Modeling and Online Detection of Stator Interturn Faults in Electrical Motors," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58, no. 5, 2011.
- [17] T. Hamiti, P. Arumugam, and C. Gerada, "Turn–turn short circuit fault management in permanent magnet machines," *IET Electr. Power Appl.*, vol. 9, no. 9, pp. 634–641, Nov. 2015.
- [18] P. Arumugam, C. Gerada, T. Hamiti, C. Hill, and S. Bozhko, "A review on turn-turn short circuit fault management," in *2015 International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles (ESARS)*, 2015, pp. 1–5.
- [19] J. A. Rosero, L. Romeral, J. Cusido, A. Garcia, and J. A. Ortega, "On the short-circuiting Fault Detection in a PMSM by means of Stator Current Transformations," in *2007 IEEE Power Electronics Specialists Conference*, 2007, pp. 1936–1941.
- [20] Y. Lee and T. G. Habetler, "An On-Line Stator Turn Fault Detection Method for Interior PM Synchronous Motor Drives," in *APEC 07 - Twenty-Second Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*, 2007, pp. 825–831.
- [21] B. M. Ebrahimi and J. Faiz, "Feature extraction for short-circuit fault detection in permanent-magnet synchronous motors using stator-current monitoring," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 25, no. 10, pp. 2673–2682, 2010.
- [22] A. Stavrou, H. G. Sedding, and J. Penman, "Current monitoring for detecting inter-turn short circuits in induction motors," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 16, no. 1, pp. 32–37, 2001.
- [23] W. G. Zanardelli, E. G. Strangas, and S. Aviyente, "Identification of Intermittent Electrical and Mechanical Faults in Permanent-Magnet AC Drives Based on Time–Frequency Analysis," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 43, no. 4, pp. 971–980, 2007.
- [24] O. A. Mohammed, Z. Liu, S. Liu, and N. Y. Abed, "Internal Short Circuit Fault Diagnosis for PM Machines Using FE-Based Phase Variable Model and Wavelets Analysis," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 43, no. 4, 2007.
- [25] A. P. Zheng, J. Yang, and L. Wang, "Fault detection of stator winding interturn short circuit in PMSM based on wavelet packet analysis," in *Proceedings - 2013 5th Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation, ICMTMA 2013*, 2013, pp. 566–569.
- [26] M. A. Cash, T. G. Habetler, and G. B. Kliman, "Insulation failure prediction in AC machines using line-neutral voltages," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 34, no. 6, pp. 1234–1239, 1998.
- [27] J. C. Urresty, J. R. Riba, M. Delgado, and L. Romeral, "Detection of demagnetization faults in surface-mounted permanent magnet synchronous motors by means of the zero-sequence voltage component," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 27, no. 1, pp. 42–51, 2012.
- [28] J.-C. Urresty, J.-R. Riba, H. Saavedra, and L. Romeral, "Detection of inter-turns short circuits in permanent magnet synchronous motors operating under transient conditions by means of the zero sequence voltage," *Proc. 2011 14th Eur. Conf. Power Electron. Appl.*, pp. 1–9, 2011.
- [29] O. Wallmark, L. Harnfors, and O. Carlson, "Control Algorithms for a Fault-Tolerant PMSM Drive," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 54, no. 4, pp. 1973–1980, Aug. 2007.
- [30] J.-C. Urresty, J.-R. Riba, and L. Romeral, "Diagnosis of Interturn Faults in PMSMs Operating Under Nonstationary Conditions by Applying Order Tracking Filtering," *IEEE Trans. POWER Electron.*, vol. 28, no. 1, 2013.
- [31] J. Hang, J. Zhang, M. Cheng, and Z. Wang, "Fault diagnosis of mechanical unbalance for permanent magnet synchronous motor drive system under nonstationary condition," in *2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, 2013, pp. 3556–3562.

- [32] F. Cira, M. Arkan, and B. Gumus, "Detection of Stator Winding Inter-Turn Short Circuit Faults in Permanent Magnet Synchronous Motors and Automatic Classification of Fault Severity via a Pattern Recognition System," *J. Electr. Eng. Technol.*, vol. 11, no. 2, pp. 416–424, 2016.
- [33] M. Khan and M. A. Rahman, "Development and Implementation of a Novel Fault Diagnostic and Protection Technique for IPM Motor Drives," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 56, no. 1, pp. 85–92, Jan. 2009.
- [34] W. J. Staszewski, K. Worden, and G. R. Tomlinson, "TIME-FREQUENCY ANALYSIS IN GEARBOX FAULT DETECTION USING THE WIGNER-VILLE DISTRIBUTION AND PATTERN RECOGNITION," *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 11, no. 5, pp. 673–692, Sep. 1997.
- [35] J. a. Rosero, L. Romeral, J. a. Ortega, and E. Rosero, "Short-circuit detection by means of empirical mode decomposition and Wigner-Ville distribution for PMSM running under dynamic condition," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 56, no. 11, pp. 4534–4547, 2009.
- [36] J. F. Martins, V. F. Pires, and A. J. Pires, "Unsupervised Neural-Network-Based Algorithm for an On-Line Diagnosis of Three-Phase Induction Motor Stator Fault," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 54, no. 1, pp. 259–264, Feb. 2007.
- [37] C. Wang, X. Liu, and Z. Chen, "Incipient Stator Insulation Fault Detection of Permanent Magnet Synchronous Wind Generators Based on Hilbert-Huang Transformation," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 50, no. 11, pp. 1–4, Nov. 2014.
- [38] J. Rosero, A. Garcia, J. Cusido, L. Romeral, and J. A. Ortega, "Fault detection by means of Hilbert Huang transform of the stator current in a PMSM with demagnetization," *2007 IEEE Int. Symp. Intell. Signal Process. WISP*, vol. 25, no. 2, pp. 312–318, 2007.
- [39] C. P. SALOMON *et al.*, "Electrical Signature Analysis for Condition Monitoring of Permanent Magnet Synchronous Machine," *Adv. Electr. Comput. Eng.*, vol. 18, no. 4, pp. 91–98, Nov. 2018.
- [40] J. Wang and B. Sen, "Stator Inter-turn Fault Detection in SPM Machines Using PWM Ripple Current Measurement," in *7th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2014)*, 2014, pp. 2.2.03-2.2.03.
- [41] T. Ojala, M. Pietikainen, and T. Maenpaa, "Multiresolution gray-scale and rotation invariant texture classification with local binary patterns," *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 24, no. 7, pp. 971–987, Jul. 2002.
- [42] T. Ahonen, A. Hadid, and M. Pietikainen, "Face Description with Local Binary Patterns: Application to Face Recognition," *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 28, no. 12, pp. 2037–2041, Dec. 2006.
- [43] C. K. Tran, T. F. Lee, L. Chang, and P. J. Chao, "Face Description with Local Binary Patterns and Local Ternary Patterns: Improving Face Recognition Performance Using Similarity Feature-Based Selection and Classification Algorithm," in *2014 International Symposium on Computer, Consumer and Control*, 2014, pp. 520–524.
- [44] N. Chatlani and J. J. Soraghan, "Local binary patterns for 1-D signal processing," in *Proceedings of the 18th European Signal Processing Conference (EUSIPCO'10)*, 2010, pp. 95–99.
- [45] Q. Zhu, N. Chatlani and J. J. Soraghan "1-D Local binary patterns based VAD used INHMM-based improved speech recognition," in *Proceedings of the 20th European Signal Processing Conference (EUSIPCO '12)*, pp. 1633–1637.
- [46] G.-B. Huang, D. H. Wang, and Y. Lan, "Extreme learning machines: a survey," *Int. J. Mach. Learn. Cybern.*, vol. 2, no. 2, pp. 107–122, Jun. 2011.
- [47] G.-B. Huang, Q.-Y. Zhu, and C.-K. Siew, "Extreme learning machine: Theory and applications," *Neurocomputing*, vol. 70, no. 1–3, pp. 489–501, 2006.
- [48] H.-J. Rong, Y.-S. Ong, A.-H. Tan, and Z. Zhu, "A fast pruned-extreme learning machine for classification problem," *Neurocomputing*, vol. 72, no. 1–3, pp. 359–366, Dec. 2008.
- [49] S. Suresh, S. Saraswathi, and N. Sundararajan, "Performance enhancement of extreme learning machine for multi-category sparse data classification problems," *Eng. Appl. Artif. Intell.*, vol. 23, no. 7, pp. 1149–1157, Oct. 2010.

Ferhat ÇIRA



Ferhat ÇIRA, 1983 Batman doğumludur. İlk, orta ve lise öğrenimini Batman'da tamamladı 2006 yılında KTÜ Elektrik Elektronik Mühendisliği bölümünden mezun oldu, aynı yıl Dicle Üniversitesinde öğretim elemanı sınavını kazandı Şubat 2017'de İnönü Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümünden Doktora derecesi aldı. Uzmanlık alanları Elektrik Makinaları, Arıza Tespiti ve Makine öğrenmesidir. Halen Dicle Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümünde olarak görev yapmaktadır.

Constitutive Parameter Extraction of Isotropic Inhomogeneous Metamaterials Involving Coupling

Etkileşim İçeren İzotropik Homojen Olmayan Metamalzemelerin Bünye Parametrelerinin Çıkarımı

Uğur Cem Hasar¹, Mehmet Ertugrul², Hamdullah Öztürk¹

¹ Gaziantep University, Faculty of Engineering, Department of Electrical and
Electronics Engineering, 27310, Gaziantep, Turkey
uchasar@gantep.edu.tr, hamdullah.ozturk@hotmail.com

² Atatürk University, Faculty of Engineering, Department of Electrical and
Electronics Engineering, 25240, Erzurum, Turkey
ertugrul@atauni.edu.tr

Abstract

An algorithm is proposed for accurate retrieval of electromagnetic parameters of isotropic inhomogeneous metamaterial (MM-a type of engineering materials) structures. It uses two sets of recursive scattering parameter relation (forward and backward directions) for obtaining average impedance. The effectiveness of the proposed method has been examined for the considered a three-layer inhomogeneous structure consisting of MMs with split-ring-resonators, and its accuracy has been compared with the other method which uses electromagnetic property extraction from scattering parameters only in forward direction.

Keywords: Metamaterials, extraction, isotropic, inhomogeneous

Geniş Özet

Metamalzeme (MM) karakterizasyonu, mükemmel lens ve görünmezlik pelerini gibi uygulamalarda kullanılan MM'lerin farklı özelliklerini anlamada önemlidir. Literatürde ölçülen/benzetimi gerçekleştirilen saçılma (S-) parametrelerine dayanan çeşitli çıkarım teknikleri bulunmaktadır. Tüm bu yöntemlerin ortak noktası, MM yapısının homojen olduğunu varsaymalarıdır. Bununla birlikte, farklı özelliklerdeki MM'lerin ardışıl eklenmesi ile çeşitli uygulamalarda kullanılacak yapılar oluşturulabilir. Fakat, bu durum homojen olmayan bir MM yapısının oluşmasına sebep olur. Homojen olmayan MM yapıları için önerilen yöntem, sadece bir tabakayı dikkate alır ve bundan dolayı çevresinde bulunan MM levhaları arasındaki birleştirme etkisini dikkate almaz.

Son zamanlarda, MM katmanları arasındaki etkileşimi hesaba katarak homojen olmayan izotropik ve bianizotropik MM yapılarının elektromanyetik özelliklerinin belirlenmesi için gerekli çıkarım prosedürleri geliştirilmiştir. Bu çalışmalarda, empedansı bulmak için sadece bir yönlü (ileri veya geri) tekrarlamalı S-parametre ifadeleri kümesi dikkate alınmıştır. Bununla birlikte, dalga empedansı için bir yönlü bir tekrarlamalı ifadeler kümesi, MM katmanları arasındaki etkileşimin çıkarılmasında çok etkili olmayabilir. Bu çalışma-

da, daha doğru elektromanyetik parametreler elde etmek ve her bir homojen olmayan izotropik MM katmanının dalga empedansını bulmak için, çift yönlü (ileri ve geri) tekrarlamalı saçılma parametre ifadelerini (S_{11} ve S_{21} ile S_{22} ve S_{21}) kullanan yeni bir algoritma önerilmektedir. Bu algoritma ile izotropik homojen olmayan metamalzeme yapılarının elektromanyetik parametrelerinin sonuçlarının daha doğru bir şekilde elde edilmesi amaçlanmıştır. Önerilen yöntemin literatürde çalışılan bir yönlü tekrarlamalı ifadeler kümesine dayalı yönetime göre avantajı, önerilen algoritma ile iki taraflı elektromanyetik çıkarım işlemi uygulanmasıdır. Önerilen yöntem ilk olarak ayrık halka rezonatör metamalzemelerden oluşan üç katmanlı homojen olmayan bir yapının benzetimi yapılarak saçılma parametreleri kullanılarak doğruluğu incelenmiş, daha sonra da literatürdeki mevcut olan aynı yöntemlerin sonuçları ile doğrulukları karşılaştırılmıştır. Amaçlanan yöntem ile literatürdeki yöntemlerin doğruluk derecelerini değerlendirmek için çıkarım yapılan elektromanyetik özelliklerin kullanımı ile homojen olmayan MM yapısının tüm S-parametreleri incelenmiştir. S-parametrelerinin analizi için CST mikrodalga programı kullanılmıştır. Elde edilen incelemeler sonucunda, makalede önerilen çift yönlü tekrarlamalı saçılma parametre ifadeleri ile elde edilen sonuçların (özellikle empedans), literatürde önerilen tek yönlü tekrarlamalı saçılma parametre ifadeleri ile elde edilen sonuçlara göre daha yumuşak bir şekilde frekans ile değiştiği gözlemlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Metamalzemeler, çıkarım, izotropik, homojen olmayan

1. Introduction

Characterization of metamaterials (MMs) is an important step in understanding their exotic applications such as perfect lens and invisibility cloaks. There are various retrieval techniques available in the literature based on measured/simulated scattering (S-) parameters [1-5]. The common point of all these methods is that they all assume that the MM structure is homogeneous. However, more intriguing properties of various MMs can be achieved by cascading them in the propagation direction, resulting in an inhomogeneous MM structure. The method [6] proposed for inhomogeneous MM slabs considers

only-one layer and thus does not take into account the coupling effect between neighboring MM slabs. In recent studies [7],[8], retrieval procedures for extraction of electromagnetic properties of inhomogeneous isotropic and bianisotropic MM structures are proposed taking into account the coupling between nearby resonating MM slabs. In those studies, only one set of recursive S-parameter expressions (S_{11} and S_{21} for [7] and S_{11} , S_{22} , and S_{21} for [8]) was considered for finding the impedance. However, as to be demonstrated shortly, one set of recursive expressions for the wave impedance may not be so effective in extracting coupling between MM slabs because the coupling depends on the order of neighboring layers in the whole inhomogeneous MM structure. In this letter, we propose a new algorithm using two-directional recursive scattering parameter expressions (S_{11} & S_{21} set for the forward direction and S_{22} & S_{21} set for the backward direction) for obtaining more accurate wave impedance and refractive index of each layer of inhomogeneous isotropic MM structures.

2. Proposed Algorithm

Fig. 1 shows an inhomogeneous MM structure with m homogeneous isotropic reciprocal MM slabs. Wave impedance, refractive index, and the thickness of the k th layer ($1 \leq k \leq m$) are denoted by Z_k , n_k , and d_k , respectively. $S_{11}^{(k)}$ ($S_{21}^{(k)}$) is the forward reflection (transmission) partial S-parameter from (through) the partial inhomogeneous structure specified from the interface between layers k and $k+1$ toward layer $m+1$. In a similar fashion, $S_{22}^{(k)}$ ($S_{12}^{(k)}$) is the backward reflection (transmission) partial S-parameter from (through) the partial inhomogeneous structure specified from the interface between layers $m-k$ and $m-k+1$ toward layer 1.

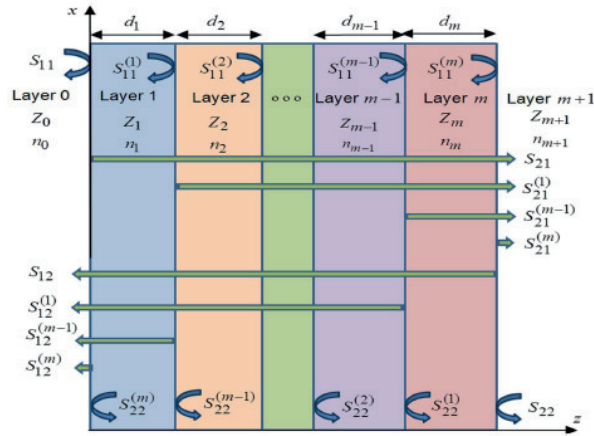


Figure 1: Demonstration of two-directional (forward and backward) recursive S-parameters of an m -layer inhomogeneous MM structure.

Assuming that plane wave in $\mp z$ direction with linear polarization in x direction is incident to the inhomogeneous isotropic structure in Fig. 1, forward and backward recursive S-parameters can be written for $e^{-i\omega t}$ time-reference as [7]

$$S_{11}^{(l)} = \frac{(Z_l + Z_{l-1}) S_{11}^{(l-1)} - (Z_l - Z_{l-1})}{(Z_l + Z_{l-1}) - S_{11}^{(l-1)}(Z_l - Z_{l-1})} \frac{1}{T_1^2}, \quad (1a)$$

$$S_{21}^{(l)} = \frac{2Z_{l-1} S_{21}^{(l-1)}}{(Z_l + Z_{l-1}) - S_{11}^{(l-1)}(Z_l - Z_{l-1})} \frac{1}{T_1}, \quad (1b)$$

$$S_{22}^{(l)} = \frac{(Z_r + Z_{r+1}) S_{22}^{(l-1)} - (Z_r - Z_{r+1})}{(Z_r + Z_{r+1}) - S_{22}^{(l-1)}(Z_r - Z_{r+1})} \frac{1}{T_r^2}, \quad (1c)$$

$$S_{12}^{(l)} = \frac{2Z_{r+1} S_{12}^{(l-1)}}{(Z_r + Z_{r+1}) - S_{22}^{(l-1)}(Z_r - Z_{r+1})} \frac{1}{T_r}, \quad (1d)$$

where $r = m - l + 1, l = 1, 2, \dots, m$, and

$$Z_k = \sqrt{\mu_k / \epsilon_k}, \quad n_k = \sqrt{\mu_k \epsilon_k}, \quad (2)$$

$$T_k = e^{+ik_0 n_k d_k}$$

$$S_{11}^{(0)} = S_{11}, \quad S_{21}^{(0)} = S_{21}, \quad (3)$$

$$S_{12}^{(0)} = S_{12}, \quad S_{22}^{(0)} = S_{22}$$

$$S_{11}^{(m)} = \frac{Z_{m+1} - Z_m}{Z_{m+1} + Z_m}, \quad S_{21}^{(m)} = \frac{2Z_{m+1}}{Z_{m+1} + Z_m}, \quad (4)$$

$$S_{22}^{(m)} = \frac{Z_0 - Z_1}{Z_0 + Z_1}, \quad S_{12}^{(m)} = \frac{2Z_0}{Z_0 + Z_1}, \quad (5)$$

Here, ϵ_k and μ_k are the complex permittivity and permeability of the layer k , and k_0 is the free-space wave number.

It is seen from (1)-(5) that Z_k and n_k of any layer k [for $k \neq 1$ and $k \neq m$] is a function of $S_{11}^{(k-1)}$, $S_{11}^{(k+1)}$, $S_{21}^{(k-1)}$, $S_{21}^{(k+1)}$, $S_{22}^{(m-k)}$, and $S_{22}^{(m-k+2)}$. For reciprocal MM slabs, we do not need to use $S_{12}^{(l)}$ recursive relations. In order to determine Z_k and n_k , we use the following steps:

1) Apply a suitable technique [1], [2] to determine separately initial values for wave impedances and refractive indices of first $k-1$ layers and the last $k+1$ to m layers.

2) (Forward: $+z$ direction) If $k \neq 1$, a) iterate $S_{11}^{(l)}$ and $S_{21}^{(l)}$ in (1a) and (1b) for $l < k$, b) express $S_{22}^{(l-1)}$ in terms of $S_{22}^{(l)}$ in (1c), and c) iterate $S_{22}^{(l-1)}$ for $m-k+2 < l \leq m$.

3) (Backward: $-z$ direction) If $k \neq m$, a) iterate $S_{22}^{(l)}$ in (1c) for $1 \leq l \leq m-k$, b) express $S_{11}^{(l-1)}$ and $S_{21}^{(l-1)}$ in terms of $S_{11}^{(l)}$ and $S_{21}^{(l)}$ in (1a) and (1b), and c) iterate $S_{11}^{(l-1)}$ and $S_{21}^{(l-1)}$ for $k < l < m$.

4) Calculate $Z_k^{(1)}$ by eliminating T_1^2 from (1a) and (1c)

$$Z_k^{(1)2} = Z_{k-1} Z_{k+1} \frac{(Z_{k+1} \Lambda_1 - Z_{k-1} \Lambda_2)}{(Z_{k+1} \Lambda_3 - Z_{k-1} \Lambda_4)}, \quad (6a)$$

$$\Lambda_1 = (1 + S_{22}^{(m-k)})(1 + T_{k+1}^2 S_{11}^{(k+1)}) \Omega_1, \quad (6b)$$

$$\Lambda_2 = (1 + S_{11}^{(k-1)})(1 + T_{k-1}^2 S_{22}^{(m-k+2)}) \Omega_2, \quad (6c)$$

$$\Lambda_3 = (1 - S_{11}^{(k-1)})(1 - T_{k-1}^2 S_{22}^{(m-k+2)}) \Omega_2, \quad (6d)$$

$$\Lambda_4 = (1 - S_{22}^{(m-k)})(1 - T_{k+1}^2 S_{11}^{(k+1)}) \Omega_1, \quad (6e)$$

$$\Omega_1 = \left(1 - T_{k-1}^2 S_{11}^{(k-1)} S_{22}^{(m-k+2)}\right), \quad (6f)$$

$$\Omega_2 = \left(1 - T_{k+1}^2 S_{11}^{(k+1)} S_{22}^{(m-k)}\right), \quad (6g)$$

5) Calculate $Z_k^{(2)}$ by eliminating T_k^2 from (1a) and (1b)

$$Z_k^{(2)2} = \frac{(1 + S_{11}^{(k+1)} T_{k+1}^2)^2 - \Omega_3^2 (1 + S_{11}^{(k-1)})^2}{\left(\frac{1 - S_{11}^{(k+1)} T_{k+1}^2}{Z_{k+1}}\right)^2 - \Omega_3^2 \left(\frac{1 - S_{11}^{(k-1)}}{Z_{k-1}}\right)^2}, \quad (7a)$$

$$\Omega_3 = S_{21}^{(k+1)} \frac{T_{k+1}}{S_{21}^{(k-1)}}, \quad (7b)$$

6) In evaluation of $Z_k^{(1)}$ and $Z_k^{(2)}$ from (6) and (7), $T_{k-1}^2 S_{22}^{(m-k+2)} \rightarrow 0$ if $k = 1$, and $T_{k+1}^2 S_{11}^{(k+1)} \rightarrow 0$ and $T_{k+1}^2 S_{21}^{(k+1)} \rightarrow 1$ if $k = m$. Then, $Z_k = (Z_k^{(1)} + Z_k^{(2)})/2$.
 7) Obtain T_k^2 from (1a) [or (1c)] using the value of Z_k

$$T_k^2 = \Omega_4 \frac{(Z_k - Z_{k-1}) - S_{11}^{(k-1)}(Z_k + Z_{k+1})}{(Z_k - Z_{k-1})S_{11}^{(k-1)} - (Z_k + Z_{k+1})}, \quad (8a)$$

$$\Omega_4 = \frac{(Z_{k+1} - Z_k) S_{11}^{(k+1)} T_{k+1}^2 + (Z_{k+1} + Z_k)}{(Z_{k+1} - Z_k) + S_{11}^{(k+1)} T_{k+1}^2 (Z_{k+1} + Z_k)}, \quad (8b)$$

Then, extract n_k from (8a)

$$n_k = \frac{-iln(T_k^2) + 2\pi m_b}{2k_0 d_k}, \quad m_b = 0, \bar{1}, \bar{2}, \dots \quad (9)$$

where m_b denotes the branch index whose correct value can be determined from [3].

8) Reiterate the steps 2 through 6 for any other layer in the inhomogeneous MM structure using newly found Z_k and n_k values of the layer k .

9) Repeat the steps 1 through 8 for the layers whose electromagnetic parameters are computed till the end of the maximum iteration number (N_{max}).

Because the mean value of $Z_k^{(1)}$ and $Z_k^{(2)}$ is used for Z_k in steps 4 - 6, it can be considered that our proposed algorithm is combination of the method [6] and the method [7].

3. Simulations and Validation

For validation of our extraction algorithm, we extracted electromagnetic properties of an inhomogeneous MM structure in Fig. 2(a) consisting of a MM slab with split-ring-resonator (SRR), FR4 material, and a MM slab with SRR and Wire. The dimensions of the SRR and SRR-Wire structures were set similar to those of the study [7] in order to compare the results. The SRR structure in cubical form with side $d_1 = 2.5$ mm is constructed over the front face of the FR4 substrate with thickness 0.25 mm, and relative electrical permittivity $\epsilon_{rs} = 4.4(1 + j0.02)$ ($\mu_{rs} = 1$). It has an outer ring 2.2 mm, a separation distance between rings 0.15 mm, a linewidth of each ring 0.2 mm, and a gap of both rings 0.15 mm. Besides, for the SRR-Wire structure, in addition to the SRR configuration it has a wire with 0.2 mm linewidth extending in the x direction at the back of the FR4 substrate. FR4 material has thickness of $d_2 = 2.0$ mm. It is known that the SRR and

SRR - Wire structures show isotropic MM slab property [2] for the assumed plane wave propagation in the z direction with polarization vector in the x direction.

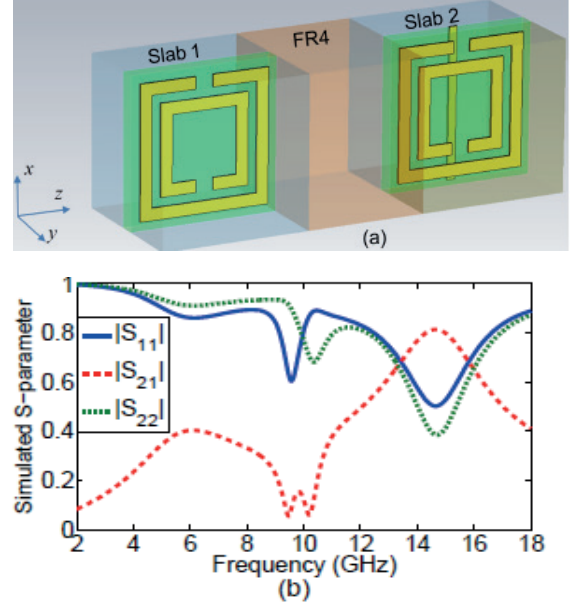


Figure 2: (a) Geometry of the analyzed three-layer [SRR, FR4, and SRR-Wire] inhomogeneous structure and (b) its simulated magnitudes of S-parameters.

We used the CST Microwave Studio for obtaining simulated S-parameters. Two waveguide ports were located over xy planes at $z = 0$ and $z = d_1 + d_2 + \dots + d_m$ for extraction of electromagnetic properties of inhomogeneous isotropic MM structures. Perfect electric (magnetic) conductors were assumed to be located at yz (xz) planes to simulate uniform plane wave propagation in $+z$ direction with polarization in $+x$ direction. Adaptive meshing feature of the CST program was set active, and 114,362 hexahedral cells for $f = 2:18$ GHz were used to discretize the computational domain. Magnitudes of simulated S-parameters of the whole inhomogeneous MM structure are shown in Fig. 2(b). It is seen from Fig. 2(b) that magnitudes of S_{11} and S_{22} are different due to reflection asymmetry of the inhomogeneous MM structure.

We applied our retrieval algorithm (in conjunction with the transfer-matrix method [2]) and the retrieval algorithm in [7] (or another similar retrieval algorithm [8]) to extract electromagnetic properties of the SRR - Wire structure using the S-parameters of the three-layer inhomogeneous isotropic MM structure in Fig. 2(a). We set $N_{max} = 3$ for both algorithms. In addition, we applied the method in [1] using simulated S-parameters of the SRR-Wire only. Figs. 3(a) and 3(b) illustrate the extracted real parts of z_3 and n_3 of the SRR-Wire structure obtained by all methods. For conciseness, imaginary parts of extracted parameters the SRR-wire structure are not shown. It is seen from Fig. 3 that retrieved real parts of z_3 and n_3 by the extraction algorithm [7] and our extraction algorithm are in good agreement with each other and with the retrieved real parts of z_3 and n_3 by the extraction algorithm [1] except around resonance region between 9 and 11 GHz (see $|S_{21}|$ in Fig. 2(b)) due to coupling between resonating MM slabs.

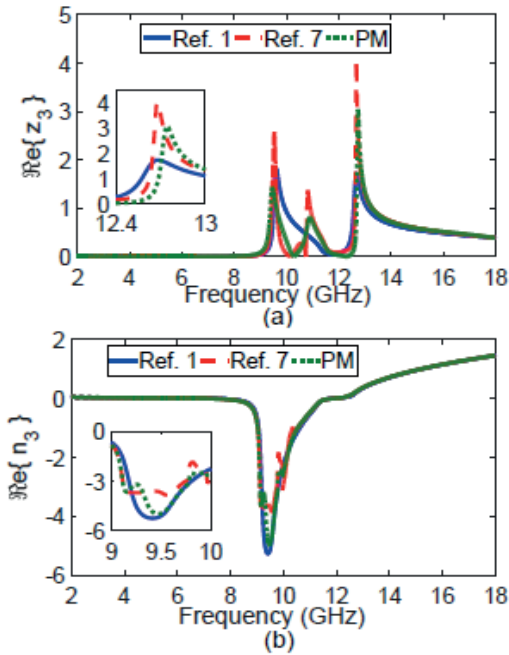


Figure 3: Real parts of retrieved (a) z_3 and (b) n_3 of the SRR-Wire MM slab by the extraction techniques in [1] and [7], and the proposed method (PM).

Nonetheless, our extraction algorithm retrieves more smoother electromagnetic parameters (see the insets in Figs. 3(a) and 3(b)) around the resonance region compared with the parameters retrieved by the extraction algorithm [7], since our algorithm considers two-directional recursive S-parameters (S_{11} & S_{21} and S_{22} & S_{21}) in evaluation of electromagnetic parameters of each isotropic MM slab. Besides, Figs. 4(a) and 4(b) illustrate the magnitudes of reconstructed (and simulated) S_{11} and S_{21} of the whole structure using electromagnetic properties of each slab extracted by our algorithm and the method [7] using the transfer matrix method [2]. It is seen from Figs. 4(a) and 4(b) that simulated and reconstructed S-parameters are in good agreement with one another except for some small differences especially around the resonance region. Therefore, although retrieved parameters of MM slabs by our algorithm and the algorithm [7] could produce similar reconstructed S-parameters of the whole three-layer inhomogeneous structure, our algorithm produces more smoother extracted electromagnetic parameters of individual MM slabs by applying two-directional recursive S-parameters.

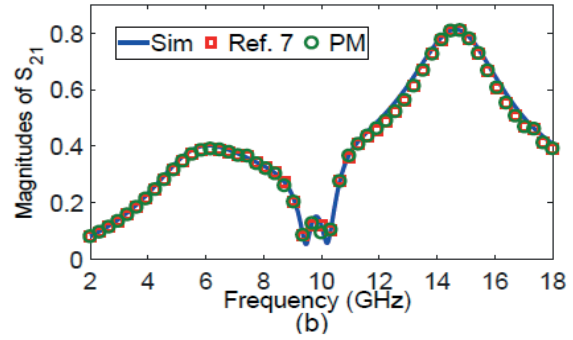
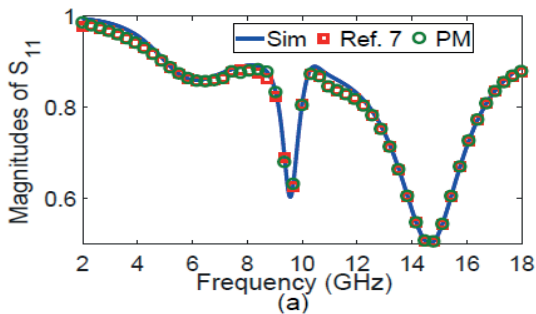


Figure 4: Simulated (Sim) and retrieved (a) $|S_{11}|$ and (b) $|S_{21}|$ of the whole structure by the algorithm [7] and the proposed method (PM).

4. Conclusion

A retrieval method is proposed for smoother and accurate extraction of electromagnetic parameters of isotropic inhomogeneous metamaterial structures. The advantage of the proposed method over the examined method in the literature is while our proposed algorithm uses two-directional recursive electromagnetic extraction process, the method in the literature just uses one-directional recursive electromagnetic property extraction process. Our proposed method was firstly validated by simulated scattering parameters of a three-layer inhomogeneous structure composed of split-ring-resonator MM slabs, and then its accuracy was compared with the accuracy of the examined method available in the literature.

5. Acknowledgment

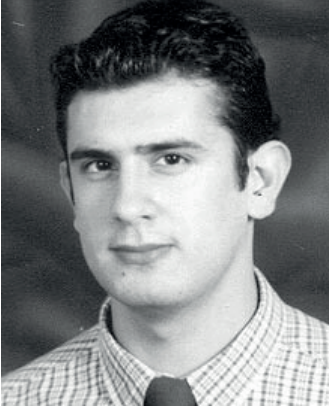
Authors would like to thank The Scientific and Technological Research Council of Turkey (TUBITAK) under the project number 218M341 for financing this study.

6. References

- [1] Nicolson, A. M. and Ross, G. F., "Measurement of the intrinsic properties of materials by time-domain techniques", *IEEE Transactions on instrumentation and measurement*, vol. 19, no. 4, pp. 377-382, 1970.
- [2] Smith, D. R., Schultz, S., Markoš, P., & Soukoulis, C. M., "Determination of effective permittivity and permeability of metamaterials from reflection and transmission coefficients", *Physical Review B*, vol. 65, no. 19, 195104, 2002.
- [3] Hasar, U. C., Barroso, J. J., Sabah, C., Kaya, Y., & Ertugrul, M., "Stepwise technique for accurate and unique retrieval of electromagnetic properties of bianisotropic metamaterials", *JOSA B*, vol. 30, no.4, pp. 1058-1068, 2013.
- [4] Jing, X., Xia, R., Wang, W., Tian, Y., & Hong, Z., "Determination of the effective constitutive parameters of bianisotropic planar metamaterials in the terahertz region", *JOSA A*, vol. 33, no. 5, pp. 954-961, 2016.
- [5] Hasar, U. C., Muratoglu, A., Bute, M., Barroso, J. J., & Ertugrul, M., "Effective constitutive parameters retrieval method for bianisotropic metamaterials using waveguide measurements", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 65, no. 5, pp. 1488-1497, 2017.
- [6] Smith, D. R., Vier, D. C., Koschny, T., & Soukoulis, C. M., "Electromagnetic parameter retrieval from

- inhomogeneous metamaterials”, *Physical review E*, vol.71, no. 3, 036617, 2005.
- [7] Shi, Y., Li, Z. Y., Li, K., Li, L., & Liang, C. H., “A retrieval method of effective electromagnetic parameters for inhomogeneous metamaterials”, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 65, no.4, pp. 1160-1178, 2017.
- [8] Hasar, U. C., Buldu, G., Kaya, Y., & Ozturk, G., “Determination of effective constitutive parameters of inhomogeneous metamaterials with bianisotropy”, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 66, no. 8, pp. 3734-3744, 2018.

Uğur Cem HASAR



Uğur Cem HASAR, lisans ve yüksek Lisans derecelerini sırasıyla 2000 ve 2002 yıllarında Adana, Çukurova Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümünden almıştır. Doktora eğitimini 2008 yılında, Binghamton, New York Eyalet Üniversitesi, Elektrik ve Bilgisayar Mühendisliği bölümünde tamamlamıştır. 2000-2005 yılları arasında Çukurova Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümünde, 2005-2008 yılları arasında ise Erzurum, Atatürk Üniversitesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmıştır. 2009-2011 yılları arasında Erzurum, Atatürk Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümünde yardımcı doçent, 2011-2013 yılları arasında ise Doçent olarak görev yapmıştır. Daha sonra Gaziantep Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Bölümünde Doçent olarak görev yapmaya başlamıştır. Şu an aynı üniversitede Profesör olarak görevine devam etmektedir.

Başlıca araştırma alanları arasında mikrodalga frekanslarında malzemelerin tahribatsız muayenesi ve değerlendirilmesi, yeni kalibrasyon bağlı ve bağımsız mikrodalga yöntemleri ile geleneksel malzemelerin elektriksel ve fiziksel karakterizasyonun yapılması, milimetre dalgaları ve THz frekansları, yüksek güç yoğunluğu uygulamaları için yüksek sıcaklıkta paketleme, gözenekli silikon temelli cihazlar ve uygulamaları ve metalmalzemeler bulunmaktadır.

Hamdullah ÖZTÜRK



Hamdullah ÖZTÜRK, 2015 yılında Ankara, Atılım Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümünden mezun olmuştur. 2018 yılında Hatay, İskenderun Teknik Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği bölümünden yüksek lisans derecesini almıştır. 2018 yılında Gaziantep Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü'nde Elektromanyetik Alanlar ve Mikrodalga Tekniği Anabilim Dalında doktora eğitimine başlamıştır ve halen devam etmektedir. Araştırma alanları arasında malzemelerin mikrodalga tarafından karakterizasyonu, sensör teknolojileri ve anten yer almaktadır.


Mehmet ERTUĞRUL



Mehmet ERTUĞRUL, 1986 yılında Erzurum, Atatürk Üniversitesi, Fizik Bölümü'nden mezun oldu. Yüksek Lisans ve Doktora derecelerini sırasıyla 1990 ve 1994 yıllarında Erzurum, Atatürk Üniversitesi, Atom Fiziği alanından almıştır. 1994-1996, 1996-2001 ve 2001-2002 tarihleri arasında Erzurum, Atatürk Üniversitesi Fizik Bölümü'nde sırasıyla Yardımcı Doçent, Doçent ve Profesör olarak görev yapmıştır. 2003 yılından itibaren, Erzurum, Atatürk Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümünde Profesör olarak görev yapmaya başlamıştır. Uluslararası dergilerde yayınlanan başlıca yazar ve yardımcı yazar olarak yer aldığı 120' den fazla makalesi mevcuttur. Şu anki araştırma alanları arasında, süperiletken ve yarı iletken cihazlar ve uygulamaları, nanofabrikasyon ve nanoelektronik yer almaktadır. Prof. Mehmet Ertuğrul, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu ve Türkiye Bilimler Akademisi ödüllerine layık görülmüştür.

Istanbul Teknik Üniversitesi'nde Gençlerle Mühendislik Kültürü Üzerine Bir Sohbet

A Talk at Istanbul Technical University with Young on Engineering Culture

Mithat İdemen 

Istanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye
midemen@gmail.com

Öz

Bu makale, 23 Ekim 2019 günü İstanbul Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'nde 'giriş ve etik' dersi kapsamında öğrencilere yönelik olarak yapılmış bulunan bir konuşmanın derlemesinden oluşmaktadır. Makalede, çağdaş mühendisliğin matematik ve fizikle çok sıkı bir biçimde iç içe geçmiş bir kültürel yapısının olduğu ve, önemli olanla ölçülemeyecek kadar önemsiz olanı birbirinden ayırmak esasına dayanan bu kültürün tarihsel gelişimi ile teknik konular bakımından olduğu kadar sosyal konular bakımından da toplum yaşamında oynadığı önemli roller örneklerle anlatılmaya çalışılmıştır.

Anahtar kelimeler: Mühendislik, fizik, matematik, Newton mekaniği, Maxwell teorisi, özel rölativite, distribüsyon

Abstract

This paper consists of a compilation of a speech addressed to students at the Department of Electrical and Electronics Engineering of the Istanbul Technical University on October 23, 2019. In the paper the *cultural* aspect of the contemporary engineering is emphasized, which dwells on its close interaction with mathematics and physics, and permits one to distinguish the important things from negligible ones. The historical development as well as the importance of this culture, from technical and social points of view, are revealed through some examples.

Keywords: Engineering, physics, mathematics, Newtonian mechanics, Maxwell's theory, special relativity, distribution

Giriş

Merhaba gençler.

Önce, yaşamınızın bundan sonraki kısmını mühendis olarak sürdürmeye karar vermiş olduğunuz için çok şanslı olduğunuzu söylemek ve sizi kutlamak istiyorum. Çünkü, yıllar geçtikçe daha net fark edebileceğiniz gibi, mühendislik bir hüner sahibi olmanın ötesinde, bir *kültürdür*: Matematik ve fizikle¹ iç içe geçmiş, kazanılması kolay olmayan, çok yüksek ve çok yönlü bir kültür. Bunun bilincinde olmanızı ve bu üniversitede geçireceğiniz günlerde, size verilecek teknik bilgilere ek olarak, bu kültürü de derinlemesine sahiplenmenizi tavsiye ediyorum. Bu kültür size, farkında olmasanız bile, doğruyla yanlışı, iyiyile kötüyü, özellikle de *önemli olanla ihmal edilebilecek olanı* kolayca ayırt edebilmek yeteneğini kazandıracaktır.

Bu söylediklerim sadece bilimsel ve teknik konular için değil, sosyal konular için de geçerlidir. Üzülerek belirtmek isterim ki; sosyal konular söz konusu olduğunda, sözünü ettiğim o yetenek zaman zaman sizin için bir mutsuzluk kaynağı da olacaktır. Çünkü, başka kültürlerin içinde olgunlaşmış olanların bazı yanlışların peşinden inatla koşturduklarını, onları hevesle alkışladıklarını ve önemli olanla önemli olmayanı birbirinden ayırt edemedikleri için anlamsız ayırmacılığa, kavgalara, savaflara ve zulme yöneldiklerini gördükçe şaşırarak, üzülecek ve acı çekeceksiniz.

Bugün benim amacım, size, sahiplenmenin eşliğinde olduğunuz o kültürün nasıl bir şey olduğunu, ne zaman ve nasıl ortaya çıkıp bin yıllardan beri var olan başka kültürlerin arasında kendine bir yer edinebildiğini ve Tanrının yarattığı ilkel insanı nasıl soyutlama yeteneğine sahip uygar insana evirdiğini, kendi yorumumla anlatmaktır.

¹ Bu konuşmada fizik sözcüğü kimya ve biyoloji gibi doğal olayları da içermektedir.

1. Önce, *mühendis* sözcüğü ile kastettiğimiz şeyin ne olduğunu açıklığa kavuşturmaya çalışalım. Bu sözcük bu günlerde elektrik, bilgisayar, makina, tarım, meteoroloji vb pek çok sözcükle birlikte kullanılmaktadır. Yakın bir gelecekte biyoloji, tıp, genetik vb sözcüklerle birlikte kullanılıyor olduğunu da göreceğiz. Göreceğiz ama bu sözcükten hepimiz aynı şeyi mi anlayacağız?. O şüpheli.

Bugün bizim kullandığımız mühendis sözcüğü Arapça 'hendese'den, o da Farsça 'endaze'den geliyor. Hendese geometri (veya matematik), endaze ise bir uzunluk ölçüsüdür. Yani mühendislik, ölçüp biçmek ve matematik yapmakla iç içe geçmiş bir faaliyet. Mühendisliğin batı dillerindeki karşılığı olan *ingénieur* ve *engineering* gibi sözcükler ise Latince 'ingenium'dan geliyor. *Ingenium* zekâ, daha doğrusu keskin zekâ anlamında. Buradan açıkça anlaşılıyor ki; hem doğu hem de batı dünyasında mühendislik matematiğe dayalı, keskin zekâ ürünü olan yaratıcılığı kastetmektedir.

Binlerce yıl önce yapılmış mimarlık şaheseri Mısır piramitleri, kiliseler, camiler, köprüler, su kemerleri ilk mühendislik örnekleri; Michelangelo², Mimar Sinan³ ve adını bilemediğimiz veya hatırlayamadığımız niceleri de ilk büyük mühendislerdi. Daha yakın zamanlarda yaşamış olan Edison⁴, Marconi⁵, Tesla⁶ ve benzerleri de modern çağın ilk büyük mühendisleri olarak uygarlığımızın gelişmesine çok büyük katkılarda bulundular. Bu büyük insanlar bıkmadan, usanmadan, inatla *deneyerek* hayallerini gerçekleştirdiler, eserlerini bize miras bırakıp gittiler.

Fakat o günler artık çok gerilerde kaldı. Bugün hayaller masa başında, kâğıt kalem kullanılarak, matematikle tasarlanmakta, ortaya çıkan sonuçlar laboratuvarlarda test edilip olgunlaştırıldıktan sonra mühendislik ürünü olarak topluma sunulmaktadır. Her gün böylece yaratılmış yeni ürünler görmeye çok alıştık. Uzay haberleşme sistemleri, uzay araçları, tomografi, robotik, akıllı telefonlar, bilgisayarlar, akıllı füzeler ve benzerleri bunun ilk akla gelen örnekleridir.

Şimdi bu aşamada, hemen şu soru ortaya atılabilir: Biz bugün *mühendislik* sözcüğü ile hep bu türden, matematikle iç içe geçmiş keskin zekâ ürünü faaliyetleri mi kastediyoruz, yoksa

daha başka şeyleri mi? Etrafımıza baktığımızda açıkça görüyoruz ki; eğitimini mühendis olarak tamamlamış bulunan insanlar

- yönetim (belediye başkanı, milletvekili, bakan, vb)
- işletme (bakım, onarım, vb)
- araştırma-geliştirme (eğitim, patent, vb)

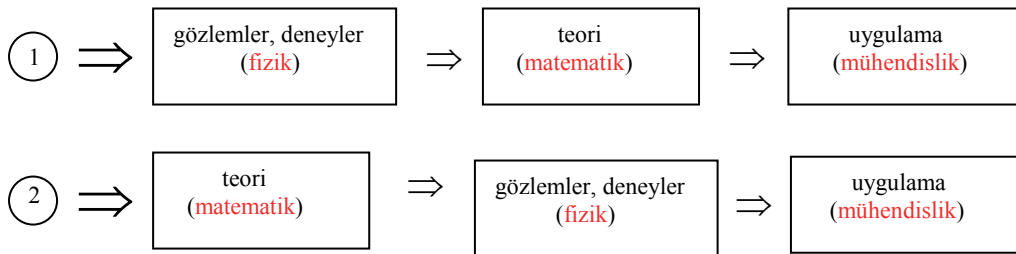
gibi çok değişik konularla ilgilenmektedirler. İlk iki guruptaki insanların matematik işlemlerle ilgilenmedikleri ve keskin zekâ ürünü olarak değerlendirilebilecek ürünler ortaya koymaya çalışmadıkları apaçık ortadadır. Bu durumda, bunların yaptığı işi mühendislik olarak nitelendirmek mümkün müdür? Cevap ne olursa olsun, eğer bu insanlar o kültürü içselleştirmiş iseler, işlerini yaparken alacakları her karar o kültürün gösterdiği yönde oluşacak ve, genellikle, topluma yarar sağlayacaktır. Biz ülkemizde bunun *ters* örneklerini, hem teknik hem de sosyal konularda her gün bol bol görmekteyiz.

2. Bugün yüksek düzeydeki dergilere veya kitaplara baktığımızda, bazen, yapılmış olan işin matematik mi, fizik mi veya mühendislik mi olduğuna karar vermekte zorlandığımızı görürüz. Yani, bu kavramlar çok iç içe geçmiş durumdadır. Geçen yüzyılın büyük matematikçilerinden David Hilbert⁷'in o yüzyılın ilk çeyreğinde söylemiş olduğu 'fizik, fizikçilere zor geliyor' sözü bu durumu çok hoş bir biçimde belirtmektedir. Aynı yüzyılın ikinci yarısından sonra mühendisliğin her dalında gözlenen ve çok sofistike kavramlar üzerine oturan muhteşem gelişmeleri göz önüne alarak,

artık mühendislik mühendislere zor geliyor

da diyebiliriz.

Son dört yüzyılda yaşanmış olan süreç gösteriyor ki; matematik, fizik ve mühendislik arasındaki ilişki her zaman farklı iki biçimde sıralanır olmuştur. Bunları şematik olarak şöyle göstermek istiyorum.



² Michelangelo di Lodovico Buonarroti Simoni (1475-1564).

³ Mimar Sinan (1489-1588)

⁴ T. A. Edison (1847-1931)

⁵ G. Marconi (1874-1937). Nobel fizik ödülü 1909

⁶ Nicola Tesla(1857-1943)

⁷ D. Hilbert (1862-1943)

Birinci sıralamadaki matematik, 'bilineni matematik diliyle tanımlamak', ikinci sıralamadaki ise 'henüz bilinmeyen iddia' aşamasındadır. Bunları birer örnekle berraklaştırmak istiyorum.

3. Birinci türden bir sıralanma teorisinin deneyden sonra geldiği hale ilişkindir ve doğal olan bir süreçtir. Bu süreç olayı (veya konuyu) berrak biçimde kavrayabilmemiz bakımından çok önemlidir. Çünkü biz, farkında olmasak bile, ancak matematik kavramlarla ifade edilen şeyleri berrak biçimde anlayabilmekteyiz. Einstein'ın 1912 yılında Sommerfeld⁸'e yazdığı şu sözleri ciddiye almak gerekir:

'Gençliğimde başarılı bir fizikçinin sadece elementer matematik bilgisine gereksinimi olduğunu düşünürdüm. Daha sonra, büyük teessüfle anladım ki; bu düşüncem tamamıyla yanlışmış⁹.

Deneyden sonra teori'nin bence en ilginç ve uygarlık tarihimiz bakımından en önemli örneği, başlangıcı üç dört yüzyıl kadar gerilere giden ve hikâyesi 17. yüzyılı boydan boya kaplayan rasyonel mekanik⁹ ve uzantılarıdır. Uygur insanın, kendisini ilkel atalarından ayıran en önemli özelliği olan soyutlama yeteneğinin ilk defa ve en belirgin biçimde ortaya çıkmış olduğu bu olayı, gerisindeki ilginç hikâyeleri atlayarak, kısaca hatırlatmak istiyorum: Atalarımız, yapacak başka işleri olmadığı için, bin yıllar boyunca, geceleri gökyüzünü bir tiyatro sahnesi gibi gözetleyip durdular. Her akşam Güneş batınca yıldızlar, tiyatro oyuncularına gibi, sırayla, birer birer sahnede yerlerini alıyor ve sabaha kadar ağır ağır rollerini oynayıp gözden kayboluyorlardı. Onları gözetlemek şüphesiz çok hoşlarına gidiyordu. Onlara, şekillerine bakarak, Büyük Ayı, Küçük Ayı, Terazi vb adlar takmışlar; Güneş ile Ay'ın bacı kardeş oldukları gibisinden efsaneler de uydurmuşlardı. Çoğunluk böylece eğlenip oyalanıyordu ama gökyüzüne daha ciddi yaklaşımlarla, bir laboratuvar gibi bakan birkaç kişi de vardı. Örneğin, Tycho Brahe¹⁰ adlı bir Danimarkalı, her akşam değişik konumda yer alan gezegenleri düzenli biçimde gözetlemiş ve onların konumlarını tablolar şeklinde bir yerlere kaydetmişti... O gezegenlerin neden başlarını alıp uzaklara gitmediğini, belirli bir zamanın sonunda gene aynı yerde belirmediğini merak edip tartışanlar da olmuştu. Kimine göre onlar Dünya'nın, kimine göre Güneş'in, kimilerine göre de bilinmeyen başka bir noktanın etrafında, çemberler üzerinde dolanıp duruyorlardı. Görünürde bu olayın tartışılmasının hiç kimseye faydası

⁸ Arnold Sommerfeld (1868-1951)

⁹ Rasyonel Mekanik'e ilişkin yasa ilk defa Sir Isaac Newton (1642-1727)'un 1687 de basılmış olan *philosophiae naturalis principia mathematica* adlı eserinde yer aldı. Fakat o yasanın 1666'dan önce Newton tarafından keşfedilmiş olduğu tahmin ediliyor.

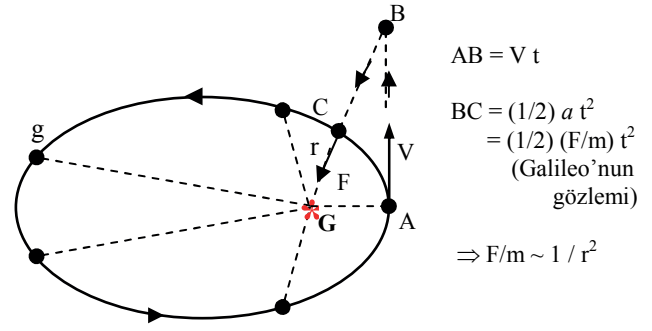
Newton kendi yasasını çıkarırken Kepler'in yasalarını, Galileo Galilei (1564-1642)'nin serbest düşüşle ilgili formülünü ve Apollonius (MÖ: 262-190)'un elipsle ilgili teoremlerini kullanmıştır. Newton'un, 'eğer Kepler olmasaydı, daha ileriye göremeyecektim' dediği söylenir.

¹⁰ Tycho Brahe (1546-1601) gözlemlerini henüz teleskop gelişmemişken yapmıştı.

yoktu ama çok meraklı birkaç insan tartışmayı hararetle sürdürüp duruyordu. Tartışanlar arasında kurum olarak bütün ağırlığıyla kilise de vardı. Tycho Brahe'nin asistanı olan alman asıllı Kepler¹¹, onun ölümünden sonra, geride bıraktığı tabloları inceleyerek, bu gün kendi adıyla anılan şu 3 iddiayı (yasayı) ileri sürmüştü (bak. şek.-1):

- Gezegenler Güneş'in etrafında bir elips üzerinde dolanıp dururlar. Güneş o elipsin bir odağında yer alır (1609),
- Güneş'i gezegene birleştiren ışın eşit zaman aralıklarında eşit alanlar süpürür (1609),
- Gezegenin hareketine ilişkin periyot p ve yörüngenin büyük çapı a ise, $p^2/a^3 = K$ evrensel bir sabite eşittir; yani, gezegen gezegene değişmez (1619).

Kepler'in sadece tablolara bakarak ileri sürmüş olduğu bu müthiş iddialar 10 yıllık bir sabrın ürünüdür ve Archimed¹² yasasından sonra, fizik olayların matematik diliyle anlatıldığı ilk örneklerdir.



Şekil 1

Dikkatinizi çekmek isterim ki; Kepler Güneş'i gördüğü zaman gezegenleri, gezegenleri gördüğü zaman da Güneş'i göremiyordu. Buna rağmen, yörüngenin düzlemsel ve elips olması gerektiğini fark etti ve o muhteşem matematik ifadeleri söyledi.

Newton, kendi adıyla bilinen ve uygarlığımızın ilk basamağını oluşturan çekim yasasını Keplerin bu iddialarını temel kabul ederek oluşturdu. Yani, yukarıda sözünü ettiğim 1 numaralı sıralamada Kepler'in iddiaları gözlem (veya deney) konumunda, Newton'un yasası ise teori konumundadır. Newton yasası (teoremi!) kısa zaman içerisinde genişletilerek, bir yandan kinematik, statik, dinamik, hidrodinamik, aerodinamik, termodinamik, elastisite, plastisite, vb bilim dalları, diğer yandan da bunların uygulamalarından oluşan inşaat, gemi, makina, uçak, meteoroloji vb mühendislik dalları ortaya çıkarıldı. Bugün biz bu mühendislik dallarının bir çırpıda sayamayacağımız kadar çok sayıdaki ürünlerinden mutluluk duyarak

¹¹ Johannes Kepler (1571-1690).

¹² Archimedes (Sicilya, MÖ: 287-212).

yararlanıyoruz ve her gün daha da yeni ürünlerin ortaya çıktığını sevinerek görüyoruz.

Bu konuyu terk etmeden önce, benim çok önemseydiğim ve sizin de önemseyeceğinizi tahmin ettiğim şu 3 noktaya dikkatinizi çekmek istiyorum:

A. Newton söz konusu yasayı 1687 yılında yayınlanan bir kitapta açıklamıştı ama o yasayı 21 yıl kadar önce, 1666 da, keşfetmiş (ispatlamış) olduğu söyleniyor. Eğer bu 21 yıllık bekleme gerçek ise, Newton'un, keşfetmiş olduğu yasanın çok önemli sonuçlara gebe olduğunun *farkında olmadığı* söylenebilir. Ben de, olayın gerisindeki bazı gerçek hikâyeleri göz önüne alarak, yasanın keşfinin (ispatının) 1687 den önce olduğu kanısındayım.

B. Newton, Archimedes ve Gauss ile birlikte geçmiş en büyük üç matematikçiden biri sayılır¹³. Newton'a bu ünü kazandıran, diğer eserlerinin yanı sıra, kütesel çekimin ($1/r^2$) ile orantılı olduğunu, henüz diferansiyel denklem kavramı ortada yokken, sadece Keplerin yasalarını, Galile'nin¹⁴ *serbest düşme* olayına ilişkin gözlemini ve Apollonius'un¹⁵ 1800 yıl kadar önce elipse ilişkin olarak ispat etmiş olduğu özellikleri kullanarak ispat etmiş olmasıdır. Newton, gezegenin yörünge üzerindeki bir A noktasından C noktasına gidişini, önce v hızıyla A dan B ye *gidiş*, sonra da B den C ye *düşüş* olarak yorumlamış ve elipsin özelliklerini de kullanarak, GC uzunluğu ile BC'nin ifadesinde yer alan a (= ivme) arasında bir ilişki bulmuştur. (bak, şek.-1)

C. Bugün, Newton yasası temel alınarak ve bir diferansiyel denklem çözülerek Kepler'in söyledikleri teorem şeklinde kanıtlanmaktadır. Güneş'in yerine bir proton, gezegenin yerine de bir elektron konursa, ilk iki yasa geçerliliğini korumaya devam eder.

4. İkinci guruptaki sıralanmanın en *tipik* örneği, bence, Maxwell¹⁶'in *elektromagnetik* teorisi ve uzantılarıdır. İnsanlar, 1873 den önce elektrik ve magnetizma hakkında oldukça geniş bilgiye sahipti ve o bilgileri kullanarak elektrik motorları, telgraf ve telefon cihazları üretmeye başlamışlardı. Elektrik alanını **E** (ve **D**), magnetik alanı da **H** (ve **B**) ile göstererek güzel hesaplar da yapıyorlardı. Maxwell 1873 yılında yayınlanan kitabında bu alanların birbirinden ayrı şeyler olmadıklarını, aynı bir olayın farklı iki bileşeni olduklarını ve bir diferansiyel denklem takımını sağladıklarını *iddia etmişti*. O denklemler bugün bizim kullanmakta olduğumuz notasyonla şöyle yazılıyor:

$$\begin{aligned} \text{rot}\mathbf{E} + \frac{\partial}{\partial t}\mathbf{B} &= 0, & \text{div}\mathbf{D} &= \rho \\ \text{rot}\mathbf{H} - \frac{\partial}{\partial t}\mathbf{D} &= \mathbf{J}, & \text{div}\mathbf{B} &= 0. \end{aligned}$$

Üçüncü denklemden yer alan **D** alanı ihmal edildiğinde, bu denklemlerin ilki Maxwell'den 40 yıl kadar önce İngiltere'de Faraday¹⁷, üçüncüsü de 50 yıl kadar önce Fransa'da Ampère¹⁸ tarafından keşfedilmiş bulunan yasaları ifade ediyordu. Diğer denklemler de statik alanlarla ilgili olarak Gauss¹⁹ zamanından beri bilinmekte olan teoremlerdi. Üçüncü denkleme **D** nin niçin eklenmiş olduğu, özellikle de niçin eksi işaretle eklendiği bilinmiyor. Maxwell'in dâhiyane sezgisinin belirtisi olan o terim insanoğlunun kaderini değiştiren bir olay oldu. Çünkü o terimin varlığı elektrik ve magnetik alanın tüm bileşenlerinin (ve onlarla ilgili her fonksiyonun), basit ortamlarda

$$\Delta E - \varepsilon\mu \frac{\partial^2}{\partial t^2} E - \sigma\mu \frac{\partial}{\partial t} E = f(x,y,z,t)$$

gibi bir denklemi sağladığını söylüyordu. **D** nin önündeki o eksi işaret bu denklemde zamana göre alınmış ikinci mertebeden türevin önündeki işaretin de eksi olmasına neden oldu. O devrin matematikçileri, böyle bir denklemi sağlayan olayın sonlu bir hızla yayılan bir dalga olayı olduğunu iddia etmeye başladılar. Onlar iddia ediyordu ama ne fizikçilerin ne de mühendislerin böyle bir dalgadan haberleri vardı. Tartışmalar 1887 yılına kadar, 14 yıl süresince, hiç bir işe yaramadan sürüp gitti. 1887 yılında Almanya'da Hertz²⁰ çok basit bir deneyle böyle bir dalganın gerçekten var olduğunu gördü ve tüm dünyaya ilan etti. Bu dalga enerji taşıyabiliyordu ve mühendislik amacıyla kullanılabilirdi. Böylece fizik yeni bir konu, mühendislik de yeni bir yol bulmuştu. Sözü edilen fizik konusu *elektromagnetizma* (veya *elektromagnetik teori*), mühendislik dalı da *radyo mühendisliği* oldu. O günden sonra, uygarlığın yönü hızla değişti. Işık olayının da bir *elektromagnetik* dalga olduğu anlaşıldı. Radyo ile haberleşme (1896), radar (1940), lazer (1957), tomografi (1984) v.d. uygulamalar peş peşe geldi. Bugün bunların her biri, ayrı ayrı, hızla genişleyen mühendislik alanlarıdır.

Elektromagnetik Teorinin '*deneyden önce teori*' için örnek olması sadece bu söylediklerimden ibaret kalmadı. O teori, bugün *Özel Rölativite Teorisi* olarak bilinen teorinin temelini oluşturan Lorentz²¹ formüllerini de içinde barındırıyordu (Lorentz formüllerinin Maxwell denklemlerinde saklı olduğu yıllar sonra ortaya çıktı[1]). Bu nedenle, bugün hemen hemen herkesin bildiği o meşhur $E = mc^2$ denkleminin ve o denklem üzerine oturan *nükleer mühendisliğin* temelini de Maxwell'in Teorisi olduğunu söylemenin yadırganacak bir iddia olmayacağını düşünüyorum.

Lorentz formüllerini Maxwell denklemlerinden, Oxyz referans sistemine²² göre sabit bir v hızıyla hareket eden Q değerindeki bir elektrik yükünün yaratmış olduğu alanının ifadesini hem Oxyz sisteminde hem de yükle birlikte hareket eden O'x'y'z' sisteminde, ayrı ayrı hesaplayıp sonuçları

¹⁷ M. Faraday (1791-1867). Yasanın keşfi 1831.

¹⁸ A. M. Ampère (1775-1836). Yasanın keşfi 1820.

¹⁹ C. F. Gauss (1777-1855)

²⁰ H.R.Hertz (1857-1938).

²¹ H. A. Lorentz (1853-1928). Lorentz formülleri 1904. Nobel ödülü 1902.

²² Burada sözü edilen referans sistemleri Galile sistemi (inertial) olarak adlandırılan *soyut* sistemlerdir.

¹³ Bunları fizikçi olarak değerlendirmek de mümkündür.

¹⁴ Galileo Galilei (1546-1642)

¹⁵ Apollonius (MÖ. 262-190)

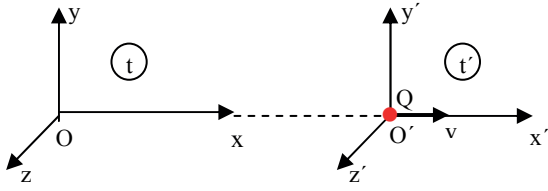
¹⁶ J.C.Maxwell (1831-1879). Teori 1873 yılında basılan

Treatise on electricity and magnetism adlı kitapta yer aldı.

karşılaştırarak çıkarmak mümkündür [1],[2] (bak. Şek.-2). Bu karşılaştırma, Oxyz ve O'x'y'z' sistemlerinde kullanılan zaman parametrelerinin birbirinden farklı olması ve uzay koordinatları ile birlikte dönüşüme uğramaları gerektiğini, yani, bilim insanları için fizik uzayın dört boyutlu olduğunu gösterir:

$$x = \frac{x' + vt'}{\sqrt{1 - v^2/c_0^2}}, \quad y = y',$$

$$z = z', \quad t = \frac{t' + (v/c_0^2)x'}{\sqrt{1 - v^2/c_0^2}}$$



Şekil 2

Fakat tarihi gelişmeler söylediğim gibi olmadı. Tartışma, önce, ışık dalgasının taşıyıcısı olarak Huygens²³ tarafından fiziğe ithal edilen ve tüm evreni doldurduğu düşünülen eter'in içinde Dünya'nın hareketini (mutlak hareket) belirlemek ve bu harekete ait hızı ortaya çıkarmak amacıyla 19. yüzyılın sonlarında yapılan deneylerin²⁴ teorik hesaplarla uyuşmamasından çıktı. Deney sonuçlarını teorik hesaplara uydurabilmek amacıyla o günlerin en önde gelen fizikçilerinden Lorentz ile en büyük matematikçilerinden Poincaré²⁵'nin göstermiş olduğu çabalar bugün Lorentz'in adıyla anılan o formülleri ortaya koydu. Lorentz, o formüllerde yer alan t nin zamanı gösteriyorlardı. Bu iddia t' nün sadece bir *matematik parametre* olduğunu, bir fizik karşılığının bulunmadığını söylüyordu.

Bir yıl sonra Einstein²⁶, farklı yerlerde aynı anda oluşan iki olayın hareket halindeki gözlemciler tarafından eş-zamanlı değerlendirilemeyeceğini, ama ışığın hızını herkesin aynı değerde gözlemleyeceğini varsayarak aynı formülleri yeniden ortaya çıkardı. Ona göre hem t hem de t' zamandı ve ilgili oldukları sistemlerde zamanı gösteriyorlardı. Bu iddia hem Newton mekaniğinin temelini oluşturan mutlak zaman ve mutlak uzay kavramlarını, hem de Huygens'in eter teorisini tümünden reddediyordu. Einstein'dan hemen sonra, o formüllerin üzerine oturan ve *özel rölativite teorisi* olarak adlandırılan teori Einstein'ın adıyla özdeşleşti ve Einstein'a tarih boyunca hiç kimseye nasip olmamış bir ün ve saygınlık kazandırdı. Çünkü onun sayesinde bilim dünyası büyük bir deprem yaşamıştı.

²³ C. Huygens (1629-1695)

²⁴ Michelson-Morley deneyi : 1881.

A. A. Michelson (1852-1931), Nobel ödülü 1907.

E. Morley (1838-1923)

²⁵ H. Poincaré (1854-1912)

²⁶ A. Einstein (1879 -1955). Nobel ödülü 1921.

5. Bu konuyu kapatırken, konuşmamın esas amacının dışında olan fakat benim çok ilginç ve dramatik olduğunu düşündüğüm bir hususa dikkatinizi çekmek istiyorum. 1905 yılında fizik dünyasında dikkatler şu 3 isim üzerinde yoğunlaşmış durumdaydı:

1. Lorentz, 52 yaşında, Nobel ödülü sahibi
2. Poincaré, 51 yaşında, çok saygın bir matematikçi
3. Einstein, 26 yaşında, henüz tanınmayan, doktora olmayan biri.

İlk ikisi birbirinden ayrı fakat iletişim halinde yapmış oldukları bir seri yayınla 1904 yılında, üçüncüsü ise 1905 de aynı formülleri çıkarmışlardı. Ama teori üçüncüye mal edildi ve onu efsaneleştirdi. Lorentz ve Poincaré 1905 den sonraki gelişmeleri sessizce izlemiş gözüktüler. Ama çok büyük bir eseri kaptırılmış oldukları için, üzülmediklerini söylemenin gerçekçi bir davranış olacağı sanmıyorum. Hatta ağır depresyon geçirmiş oldukları bile düşünülebilir. Peki, sonuç neden böyle oldu? Poincaré ve Lorentz'in yıllarca süren o inatçı çabaları neden yok muamelesi gördü? Bunun nedeni, bence, el yordamıyla çıkarmış oldukları kendi formüllerini doğru yorumlayamamış (anlamamış!) veya yorumlamak cesaretini gösterememiş olmalarıdır. Lorentz'in o formüllerde yer alan t' için, 'o zaman boyutundadır ama zaman değildir, sadece bir matematik parametredir', demesi çok şaşırtıcıdır. Çünkü formüller apaçık biçimde t ve t' bakımından simetrik yapıda gözüktüyor. Neden t zaman oluyor da t' olmuyor? Ayrıca, her ikisinin de yorumlarını eter kavramına bağlı kalarak yapmaya çalışmaları²⁷ o üzücü sonucu doğurdu. Çok büyük şeyler yapmış olan o insanlar, yorumlarını gençlik (hatta çocukluk) yıllarında beyinlerini *formatlamış olan* mutlak zaman ve eter kavramları çerçevesinde yapmaktan kendilerini kurtaramadılar. Ama onlara göre çok genç olan ve üniversiteye hazırlık yılında²⁸ her konuyu serbestçe tartışmak alışkanlığını edinmiş bulunan Einstein, beyni o kavramlarla formatlanmamış olduğu için, yorumlarını cesaretle yapabildi ve hareket halindeki gözlemcilerin farklı zaman değerlendirmeleri olduğunu iddia ederek 200 yıldan daha uzun bir zamandan beri zihinlere yerleşmiş bulunan mutlak zaman, mutlak uzay ve eter kavramlarının geçersiz olduklarını söyleyerek teorinin rakipsiz sahibi oldu.

Sözünü ettiğim formatlanma, başka bir biçimde Einstein'ın kendisinde de gözleniyor. Einstein inatçı bir *determinist*'ti. Başlangıçta kuantum devriminin ortaya çıkmasına destek olmasına karşın, 1925 yılından sonraki gelişmeleri deterministik bulmayarak, ömrünün sonuna kadar kuantum mekaniğine karşı çıkmıştı. '*Tanrı zar atmaz*' sözünü herkesin bildiğini sanıyorum.

²⁷ Hem Lorentz hem de Poincaré ömürlerinin sonuna kadar eter kavramını terk etmediler. Buldukları formülleri o çerçevede savunmaya çalıştılar.

²⁸ Einstein 1895 yılında 16 yaşındayken Zurich Polytechnic'in giriş sınavına girmiş fakat kazanamamış. Sınava hazırlanmak amacıyla gittiği Aarau kasabesindeki okulda karşılaştığı ortam ona her konuyu serbestçe düşünme ve cesaretle tartışma alışkanlığı kazandırmış. Orada edindiği *düşünsel deney* (Gedankenexperiment) alışkanlığı kariyerinin temel özelliği olmuş. Hem özel rölativitenin hem de genel rölativitenin temelini oluşturan düşünsel deneylerin (ışıkla ilgili) o okulda zihnine yerleşmiş olduğu anlaşılıyor.

Dinle ilişkisine dair bir soruya vermiş olduğu şu cevap da belleğindeki determinist formatın ürünüdür:

'Ben deterministim. Özgür iradeye inanmam. Yahudiler özgür iradeye inanırlar. Onlar insanın kendi hayatını kendisinin biçimlendirdiğine inanırlar. Ben bu doktrini reddederim. Bu nedenle, ben Yahudi değilimdir'.

Yukarıda söylediklerim, çocukluk ve gençlik yıllarında insanların beyinlerinin belirli bir biçimde formatlanmış olmasının daha sonraki zamanlarda onların düşünce sistemlerini ve kararlarını ne denli etkilemekte olduğunu açıkça göstermektedir. Sonradan gelen ve o formata uymayan yönlendirmelere (kavramlara) karşı bir isteksizlik ve hatta direnç oluşmaktadır. Bugünlerde, öğrenim çağındaki çocuklarımızın beyinlerinin, çok küçük yaşlardan başlayarak, serbest düşünmeyi ve tartışmayı yasaklayan din ağırlıklı eğitimle formatlanmaya çalışılmasının, yüz yıl kadar önce öğretmenlerimize verilmiş olan 'öğretmenler cumhuriyet sizden fikri hür, vicdanı hür, irfanı hür nesiller ister' direktifi²⁹ ile nasıl çeliştiğini görmek, ulusumuzun geleceği için beni çok ürkütmektedir.

6. Şimdi gene esas konumuza dönelim. Yukarıda sözünü etmiş olduğum örneklerde matematik ya en önde itici ya da orta konumda aktarıcı bir rol oynuyor gibi görünüyor. Fakat geçmişte bunun tersi olan, çok önemli ve ilginç olaylar da yaşanmıştır: Teorik fizik ve mühendislikteki gelişmeler zaman zaman mevcut matematiğin önüne geçmiş, onun hangi yönde gelişmesi gerektiğini göstermiştir. Bu türden matematikler önce, matematikçilerin yadırgamasına rağmen, fizikçiler ve mühendisler tarafından *acemice* kullanılmaya başlanmış, sonra da matematikçiler tarafından sağlam temellerle matematiğe ithal edilmişlerdir. Bunun en tipik örneği, bence, matematikteki devrim nitelikli gelişmelerden biri olan *distribüsyon* (veya genelleştirilmiş fonksiyon) kavramıdır. Distribüsyonların ilk örneği, bugün Dirac³⁰ fonksiyonu olarak bilinen ve klasik anlamda fonksiyon olmayan $\delta(t)$ *fonksiyonudur*. Önce, 1876 yılında tanınmış bir fizikçi olan Kirchoff [3], daha sonra, gene tanınmış bir fizikçi olan Dirac [4] tarafından *acemice* kullanılmış olan bu fonksiyon fizikçiler ve mühendisler tarafından çok benimsenmiş ve bol bol kullanılmıştır. Bulunan sonuçların önemini kavrayan matematikçiler, bu elemanı matematiğe sağlam temellerle kazandırmak için çaba göstermeye başlamışlar. Böylece, 1950 yılında L. Schwartz³¹ [5] *distribüsyon* adını verdiği kavramı matematik literatürüne kazandırmış oldu. Bu kavram, fizik bakımından çok önemli olan ve sürekli olmayan (veya sürekli bir türeve sahip bulunmayan) fonksiyonlara da bir türev karşı getirmektedir. Ben 1973 yılında Maxwell denklemlerinin bu anlamda geçerli olduklarını bir *varsayım* şeklinde iddia ederek [6], değişik bünyeye sahip ortamların arakesitinde *elektromagnetik* alanın gösterebileceği süreksizliği en genel haliyle çıkarmıştım. Benim koyduğum varsayım, alana ilişkin her bileşenin, distribüsyon anlamında (bak. Şek.-3)

²⁹ Bu sözler 25 Ağustos 1924 de, Öğretmenler Birliği Kongresi'nde Atatürk tarafından söylenmiştir.

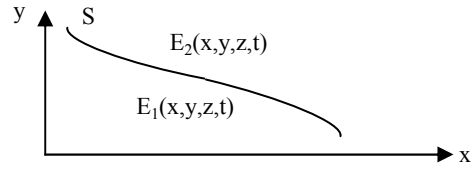
³⁰ P.A.M. Dirac (1901-1984). Nobel Ödülü 1933.

³¹ Laurent Schwartz (1915-2002). Fields Medal, 1950.

$$E(x,y,z,t) = \{E(x,y,z,t)\} + E_0(x,y,z,t)\delta(S)$$

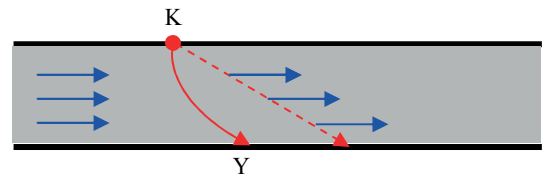
$$+ E_1(x,y,z,t)\delta'(S) + \dots + E_n(x,y,z,t)\delta^{(n)}(S)$$

şeklinde yazılabileceğini iddia ediyordu. Bu ifadede yer alan ve $\delta(S)$ (ve türevleri) ile birlikte gözüken terimler süreksizliğin söz konusu olduğu S yüzeyine yoğunlaşmış distribüsyonları (alanın *tekil kısımlarını*) gösterir. Yaylı parantezin içindeki terim ise, süreksizlik yüzeyinin dışında tanımlı olan ve klasik anlamdaki fonksiyonlarla gösterilen (*regüler*) kısımdır. Bu yaklaşımla çıkarmış olduğum ve değişik zamanlarda değişik dergilerde yayınladığım bazı sonuçlar bugünlerde yapay malzemelerle oluşturulmaya çalışılan ve *meta-surfaces* olarak adlandırılan yapıların teorik incelenmesinde temel rol oynuyor. Bu konuda dış dünyada çok yoğun araştırma ve yayın yapılmaktadır.



Şekil 3

7. Konuşmamın başında sizlere matematik, fizik ve mühendisliğin iç içe geçmiş bir faaliyet olduğunu, yapılan bir işin matematik mi, fizik mi, yoksa mühendislik mi olduğunu söylemenin bazen çok zor olduğunu söylemiştim. Şimdi bu konuyu biraz daha açıklığa kavuşturmak, mühendisliğin ortaya koymuş olduğu matematik problemlerin türünden söz etmek istiyorum. Bu problemler, genellikle, *ters problem* olarak adlandırılan türden problemlerdir. Buradaki *ters* sözcüğünün ne anlama geldiğini belirtmek için şu basit örneği göz önüne alalım. İstanbul Boğazı'nın Anadolu yakasında, Kandilli'de oturan bir iş adamı, her gün, motorla Avrupa yakasına geçip oradan işine gitmek istesin. Ne kadar zaman sonra karşı yakaya ve nereye varacağını bilmek istediğinde, motorun ve Boğazdaki akıntının hızını ve

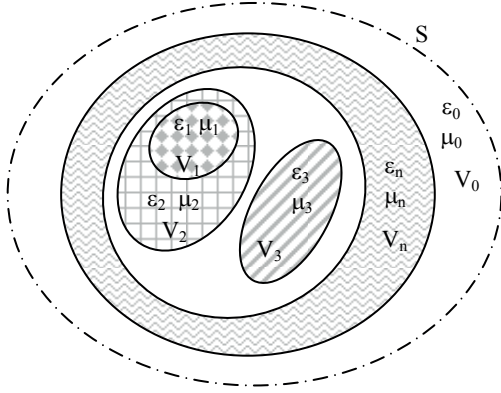


Şekil 4

motorun yönünü göz önünde bulundurarak basit bir hesap yapıp hem zamanı hem de varacağı noktayı kolayca belirler (bak. Şek.-4). Bu bir *düz* problemdir. Hem matematikçi, hem fizikçi, hem de mühendis bu türden problemlerle ilgilenir. Ama o iş adamı hem zamanı hem de varılan noktayı beğenmez ise ve '20 dakika içinde Yeniköy iskelesine varmak istiyorum, bana motorun hızını ve rotasını söyleyin', derse, iş değişir. Düz problem halinde biliniyor olan hız ve rota şimdi bilinmeyen konumundadır ve belirlenecekler arasındadır. Buna karşılık, düz problem halinde bilinmeyen konumunda olan zaman ve varış noktası biliniyordur. İşte terslik buradadır. Ay'a, Mars'a ve diğer gezegenlere gönderilen araçlar veya askeri amaçlarla kullanılan füzeler,

tahribatsız muayene (tomografi) amacıyla kullanılan sistemler hep bu türden ters problemler ortaya çıkarır. Burada sözünü ettiğim türden ters problemlere, genellikle, matematikçiler ve fizikçiler ilgi göstermezler; onlar mühendislerin problemidir.

Bu günlerde üzerinde çok çalışılan bir konu olduğu için tomografinin temel problemi hakkında da birkaç söz söylemek istiyorum. Konu, insan vücudundaki kanserli bir bölgenin veya urun, canlı dokuya zarar vermeden, dışarıdan yapılacak ölçmelerle belirlenmesidir. Bu amaçla kullanılan yöntemlerin birinde, söz konusu organ dışarıdan gönderilen, çok kısa süreli bir ışık darbesi ile aydınlatılır (foto-akustik tomografi). Bu darbenin etkisi ile canlı ortamda bir basınç dalgası oluşur ve bu dalga dışarıya doğru yayılmaya başlar. Kanserli dokunun ışıktan etkilenmesi normal dokununkinden farklı olduğu için, oluşan basınç dalgasının $t = 0$ anındaki değeri de (başlangıç değeri) kanserli ve normal dokularda farklıdır. Yöntem, bu farkı göz önüne alarak, dışarıdaki bir S yüzeyinin üzerinde basınç dalgasını ölçerek içerideki noktalarda basıncın başlangıç değerini (yani biyolojik yapıyı!) açıklığa kavuşturmaktan ibarettir (Bak. şek.-5).



Şekil 5

İçerideki yapı ve başlangıç değerleri biliniyor olsaydı, basınç fonksiyonunun dışarıdaki her noktada (ve S üzerinde!) değeri

$$\left\{ \operatorname{div} \left(\frac{1}{\varepsilon} \operatorname{grad} p \right) \right\} - \left\{ \mu \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \right\} = 0, \quad x \in \mathbb{R}^3, \quad t > 0$$

gibi bir denklemi

$$p(x, +0) = p_0(x), \quad \frac{\partial}{\partial t} p(x, +0) = v_0(x), \quad x \in \mathbb{R}^3$$

koşulları altında çözerek belirlenebilirdi (*düz problem*). Ama tomografi olayında bilinmeyenler $p_0(x)$ ve $v_0(x)$ başlangıç değerleridir. Bu nedenle, bu bir *ters problem*'dir (*ters başlangıç-değer problemi*). Problemin bu haliyle çözümü, $t > 0$ koşulu nedeniyle, oldukça zor görünüyor. Ama bunu, biraz önce size sözünü etmiş olduğum distribüsyon kavramını kullanarak, distribüsyon anlamında

$$\operatorname{div} \left(\frac{1}{\varepsilon} \operatorname{grad} p \right) - \mu \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = -\mu p_0(x) \delta'(t) - \mu v_0(x) \delta(t),$$

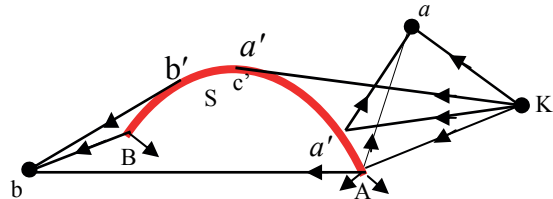
$$x \in \mathbb{R}^3, t \in \mathbb{R}$$

denkleme çevirirsek, t nin değişim aralığı $(-\infty, \infty)$ olur ve Fourier dönüşümü kullanılarak nispeten kolayca çözülebilir hale gelir. Problem artık dışarıdaki bir S yüzeyi üzerinde ölçülecek $p(x)$ (ve türevi!) değerleri kullanılarak $p_0(x)$ ve $v_0(x)$ fonksiyonlarının belirlenmesinden ibaret hale dönüşmüştür (*ters kaynak problemi*). Biz 2012 yılında, $v_0(x) = 0$ olması durumunda bu problemin çözümünü bulmuştuk [7]. Geometriden bağımsız olan o *genel* sonuç foto-akustik tomografi bakımından çok önemliydi. Ama problemin $v_0(x) \neq 0$ varsayımı altında da çözülmesi gerekir. Bu henüz açık bir problem olarak ortada durmaktadır.

8. Son olarak, bir hususa daha dikkatinizi çekmek istiyorum: Mühendis kendi problemini kendisi çözmek zorundadır. Çünkü bir problemin çözümünden matematikçinin anladığı mühendisin anladığından farklıdır. Matematikçi için önemli olan şunlardır:

1. Problemin çözümü vardır (veya yoktur)
2. Problemin çözümü tektir (veya tek değildir)
3. Problemin çözümü *şöyle* bir işlemlerle belirlenir.

Son aşamadaki işlem bazen sonsuz defa tekrar edilen iterasyonlar, bazen sonsuz terimden oluşan bir veya çok katlı toplamlar (seri), bazen hesabı açık olarak yapılamayan integraller şeklindedir. Mühendis için de bunlar önemlidir ama mühendisin beklediği bunun çok ötesinde bir şeydir. Mühendis, çözüm diye ortaya konmuş bulunan ifadenin mühendislik bakımından kolayca *yorumlanacak* bir biçimde olmasını ister. Bu nedenle, varlığıyla ifadeyi karmaşık hale getiren fakat sonuca katkısı ihmal edilecek (veya ölçülemeyecek) kadar küçük olan terimlerin fark edilerek ayıklanması gerekir. Kullandığımız ve mükemmel olduklarını söylediğimiz bütün cihazların tasarımında bu türden ayıklamalar vardır. Şekil-6 bir reflektör anten üzerinde oluşan ve mühendislik bakımından önemli etkileri olan dalgaları (bileşenleri) göstermektedir. Matematik ifade bu bileşenlerin taşıdığı enerjinin tümünü verir. Bu ifadeden hareketle, bilgisayar desteği ile bulunacak olan ondalık sayılar her bileşenin ne kadar enerji taşıdığını bilmemize olanak sağlamaz. Matematikçi için önemi olmayan bu bileşenler mühendis için son derecede önemlidir. Konuşmamın başında size söylemiş olduğum, *önemli olanla önemsiz olanı ayırt etmek yeteneği* işte bu aşamada hayati rol oynar.



Şekil 6

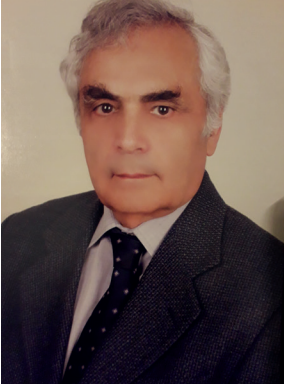
Beni sabırla dinlemiş olduğunuz için hepinize çok teşekkür ederim.

Kaynaklar

- [1] M. İdemen, Derivation of the Lorentz transformation from the Maxwell equations, J. Electrmagn. Waves Appl. (JEMWA), vol. 19 (4), pp: 451-467, 2005.
- [2] M. İdemen, Discontinuities in the electromagnetic field, John-Wiley, 2011.
- [3] G.R. Kirchhoff, Vorlesungen über mathematische Physik, Band-1, Mechanik, Leipzig, Teubner, p. 315, 1876.

- [4] P.A.M.D. Dirac, The physical interpretation of the quantum mechanics, Proc. Roy. Soc. A, Vol. 113, pp: 621- 641, 1926.
- [5] L. Schwartz, Théorie des distributions, 1950.
- [6] M. İdemen, The Maxwell equations in the sense of distributions, IEEE Trans. Antennas and Propagat., Vol.21, pp:736-738, 1973.
- [7] M. İdemen, A. Alkumru, On an inverse source problem connected with photo-acoustic and thermo-acoustic tomography, Wave Motion, vol. 49, pp: 595-604, 2012.

Mithat İDEMEN





Mithat İdemem 1958 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Elektrik Fakültesinden yüksek mühendis ünvanı ile mezun olduktan sonra Makina Fakültesi Yüksek Matematik Kürsüsü'nde asistan olarak göreve başlamıştır. Kazandığı bir NATO bursu ile 1960-63 yıllarında Paris Üniversitesi Fen Fakültesi Elektronik Enstitüsü'nde Teorik Fizik dalında doktora yapmış, 1969 da Matematik dalında doçent, 1975 yılında da Elektromagnetik Alanlar Kürsüsü'nde profesör olmuştur. İTÜ de değişik kademelerde 1997 yılına kadar sürdürdüğü öğretim üyeliği görevine ek olarak, Tübitak Marmara Araştırma Merkezi Matematik Bölümü'nde de değişik düzeylerde araştırma uzmanı ve Bölüm Başkanı olarak görev almış, iki defa da TUBITAK Bilim Kurulu üyeliğine seçilmiştir (1995, 2001- 2002).

Geliştirdiği bir *entegral dönüşüm* ve onun *kırınımın geometrik teorisi'* ndeki uygulamaları nedeniyle Sedat Simavi Bilim Ödülünü (1981), *dalga yayılımı*'ndaki çalışmaları nedeniyle TÜBİTAK Bilim Ödülünü (1983), *kuramsal ve uygulamalı* araştırmaları nedeniyle de İTÜ Vakfı Bilim ve Teknoloji Ödülünü (1997) almış olan Mithat İdemem AMS (American Mathematical Society), SIAM (Society for Industrial and Applied Mathematics), IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineering) ve WIF (World Innovation Foundation) gibi uluslararası mesleki örgütlerin üyesidir.

1993 yılında TÜBA (Türkiye Bilimler Akademisi)'ya üye seçilmiş bulunan Mithat İdemem Hükümet'in Akademi'ye müdahalesini protesto ederek 2011 yılında TÜBA üyeliğinden istifa etmiştir. Elektromagnetik Dalgaların yayılımına ilişkin temel araştırmaları nedeniyle 2005 yılında Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü'nde Onursal Doktora, 2008 yılında da Uluslararası MMET (Mathematical Methods in Electromagnetic Theory) Konferansı'nda N.A. Khizhnyak ödülünü almış olan Mithat İdemem'in uluslararası nitelikteki değişik dergilerde yayınlanmış 64 makalesi, aynı nitelikteki kongrelere sunulmuş 36 bildirisi ve biri John-Wiley tarafından İngilizce, diğerleri de İTÜ Vakfı ve Okan Üniversitesi tarafından Türkçe başılmış 5 kitabı vardır.

Düzce Çevresi Su Temini Uygulamalarında Kullanılacak 15 kWp Fotovoltaik Sistemin Fayda-Maliyet Analizi

Cost-Benefit Analysis of 15 kWp Photovoltaic System for Water Supply Application in DUZCE Region

Ali Yıldız¹ , Emin Yıldız² 

¹ Düzce Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Bölümü,
Düzce, Türkiye
aliyildizytu@gmail.com

² Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Düzce,
Türkiye
mehmetrecepminaz@siirt.edu.tr

Öz

Bu çalışmada Düzce ili gereksinimleri göz önüne alınarak su temini amaçlı kurulacak bir almaşık akım dalgıç pompasının şebeke bağlantılı 15 kWp gücünde bir Güneş Enerji Santrali (GES) üzerinden beslenmesinin fayda-maliyet çözümlemesi yapılmıştır. Bunun için Düzce'nin ışınım değerleri, dört ayrı veri tabanı göz önüne alınarak belirlenmiştir. Bölgenin 30 yıl sonraki su gereksinimi dikkate alınarak sistemin geri ödeme süresi hesaplanırken, gelecekteki enerji üretiminin doğru kestirimi gerekir. Bunun için yazında da önemli bir yer tutan PVsyst programı ve istatistiksel bir yöntem olarak da eğri uydurma yöntemi kullanılmıştır. Elde edilen veriler, var olan GES verileri de göz önüne alınarak incelenmiş ve bu üç verinin ortalaması üretim kestiriminde kullanılmıştır.

Anahtar kelimeler: Fotovoltaik, Regresyon çözümlemesi, fayda-maliyet.

Abstract

In this study, taking into consideration the requirements of Duzce province, a cost-benefit of the AC pump to be installed for water supply via grid-connected a 15 kWp Solar Power Plant (SPP) has been analyzed. Therefore, the radiation values of Duzce have been determined by considering four different databases. When calculating the refund period of the projected system considering the water requirement after 30 years, the future energy production must be estimated accurately. For this purpose, PVsyst program which has an important place in literature and curve fitting method as a statistical method has used. The calculated data's have been examined by taking into account the existing SPP data and the average of these three data has been considered in the production estimation.

Keywords: Photovoltaic, Regression analysis, Cost-Benefit.

1. Giriş

Türkiye'nin güneş enerji gizilgücü 380 TWh/yıl ve kurulu güç potansiyeli 56.000 MW olarak kestirim edilmektedir [1]. 31 Ağustos 2019 tarihi itibarıyla, Türkiye'deki elektrik enerjisi

santrali kurulu gücünün (90.403,40 MW) %6,12'sine karşılık gelen Güneş Enerjisi Santrali (GES) kurulu gücüne ulaşılmıştır [2]. Ancak güneş gizilgücü göz önüne alındığında, kurulu gücümüzün %61,9'unu sadece GES ile oluşturabiliriz. TEİAŞ'ın 2019 ağustos raporuna göre; ülkemizde 10 Lisanslı, 6420 Lisanssız olmak üzere, toplam 6430 GES bulunmaktadır. Bu santrallerden bazıları tarımsal sulama ve sondaj amaçlı kullanımlar için şebekeye bağlı (on-grid) iken, şebekeden bağımsız (off-grid) uygulamalar da vardır [3]-[7]. Yazında Şanlıurfa, Elazığ ve Kahramanmaraş gibi Türkiye'nin güneyinde kalan illerde sulama amaçlı dalgıç pompa sistemleri hakkında araştırmalar yapılmış, ancak Türkiye'nin kuzeyindeki bir il için GES beslemeli bir içme suyu sistemi bu çalışmada ilk kez incelenmiştir.

Bu çalışmada; Düzce ilindeki sondaj kuyuları ve bu kuyulardan kaynaklanan bölgenin gereksinimleri göz önüne alınarak, 30 yıl sonrasının su ihtiyacını karşılayabilecek bir su temini sisteminin güç gereksinimi belirlenmiştir. GES beslemeli bu su temini uygulamasının fayda-maliyet çözümlemesini yapmak için, üretilebilecek elektrik enerjisi miktarının kestirim edilmesi ve dolayısıyla güneş enerji (GE) gizilgücünün belirlenmesi gerekir. Bunun için yazındaki çalışmalardan farklı olarak, dört önemli veri tabanının ortalaması göz önüne alınmıştır. Bu veri tabanları; PVGIS, GEPA, Meteonorm ve NASA'dır. GES gizilgücü belirlendikten sonra, fayda-maliyet çözümlemesi için yıllık elektrik enerjisi üretiminin doğru şekilde belirlenmesi aşamasına geçilmiştir. Bunun için yazında pek çok model ve yöntem önerilmiş ve incelenmiştir [8]-[9]. Bunlardan biri de regresif yöntem kullanmaktır [10]. Regresyon çözümlemesi, istatistik biliminin en önemli konularından biridir. Bu çalışmada; Düzce ilinde yıllık enerji üretim kestirimi için, çokterimli regresyon modeli eğri uydurma yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde; her seferinde iki farklı değişken göz önüne alınarak, 6 adet regresyon modeli oluşturulmuştur. Göz önüne alınan veriler; sıcaklık ortalaması, güneşlenme süresi ve ışınım düzeyidir.

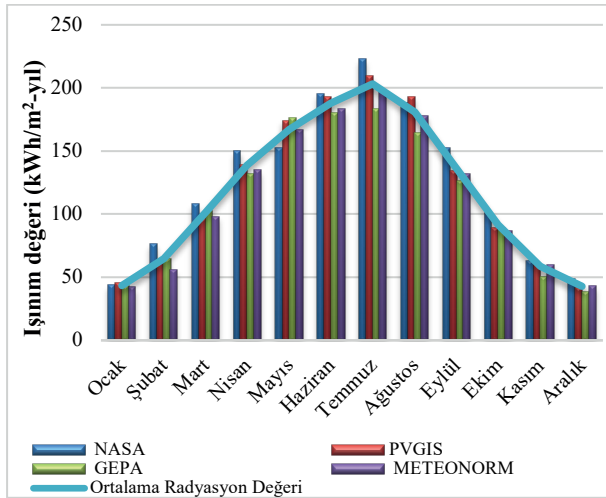
Nihai elektrik enerjisi üretim değeri için; var olan GES verileri, eğri uydurma ile elde edilen kestirim ve PVsyst programı ile elde edilen verilerin ortalaması göz önüne alınmıştır. Yazındaki GES beslemeli sulama sistemlerinin kendini geri-ödeme (amortisman) süreleri hesaplanırken,

Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına İlişkin Kanun dikkate alınarak teşvikli enerji bedeli kullanılmıştır. Ancak bu çalışmada, EPDK tarafından açıklanan ve 01.07.2019 tarihinde belirlenen kendi abone grubuna ait perakende tek zamanlı enerji bedeli göz önüne alınmıştır. İlk 10 yıllık süreçte fiyat kestirimi için geçmiş 10 yıllık dönemde meydana gelen enerji bedelindeki değişim göz önüne alınmıştır. İlk 10 yıldan sonraki süreçte ise, Enerji Piyasaları İşletme Anonim Şirketinin YEKDEM elektrik enerjisi pozitif dengesizlik fiyat ortalaması göz önüne alınarak olası fiyat belirlenmiştir.

2. Düzce'nin GE Potansiyeli Ve Su Temini

Türkiye; coğrafi konumu ve orta kuşak ikliminde yer almasından dolayı, güneşten elektrik enerjisi üretiminde önde gelen pek çok Avrupa Birliği ülkesinden daha yüksek bir GE gizilgücü vardır. Ancak ülkemiz, bu gizilgücü şimdiye kadar üretime aktaramamıştır. TEİAŞ'ın 2018 yılı Türkiye Elektrik Enerjisi Üretimine Kaynaklara Göre Dağılımı raporuna göre, üretilen 303,9 TWh enerjinin sadece %2,6'sı güneş enerjisinden sağlamıştır [11]. Aynı yıl Almanya'da bu oran %8,4 olarak gerçekleşmiştir [12]. Bu veriler ülke olarak önümüzde daha çok uzun bir yol olduğunu göstermektedir.

Ülkemizin kuzey bölgelerindeki GE gizilgücü diğer bölgelere göre nispeten düşüktür. Bir bölgenin GE gizilgücü değerlendirilirken öncelikle ışınım değerlerine bakılır. Güneş enerjisi sistem kurulumunda kabul görmüş 4 farklı veri tabanı bulunmaktadır. Bunlar; Avrupa Birliği Fotovoltaik Coğrafi Bilgi Sistemleri Veri Tabanı (PVGIS) [13], Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyel Atlası (GEPA) [14], Meteorom [15] ve Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi (NASA)'dır [16]. Şekil 1'de Düzce ilinin ışınım değerleri verilmiştir.



Şekil 1. Farklı veri sistemlerine göre Düzce ili aylık güneş ışınım değerleri

Düzce ilinin ışınım değerleri 1350-1500 kWh/m²-yıl civarındadır ve Türkiye ortalamasının altında olduğu söylenebilir. Buna rağmen göz önüne alınan dört önemli veri tabanının ışınım ortalaması 1415,685 kWh/m²-yıl'dır. Bu değer Almanya'nın en büyük kurulu güç kapasiteli GES'lerin buldukları eyaletlerde görülen ışınım düzeyleri ile karşılaştırılmıştır. Almanya'nın en büyük 7 GES'inin kurulu güçleri [17, 18] ve ışınım düzeyleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1'deki GES'lerin ışınım düzeyleri; buldukları eyaletler göz önüne alınarak, PVGIS üzerinden belirlenmiştir. Düzce'nin ışınım düzeyi, incelenen 7 GES'in ortalamasından %32.72 daha fazladır.

Tablo 1. Almanya'nın en büyük GES'lerinin kurulu güçleri ve bulunduğu konuma göre ortalama ışınım düzeyleri

Tesis Adı	Kurulu güç (MWp)	Işınım (kWh/m²-yıl)
Senftenberg Güneş Kompleksi	166	1078
Neuhardenberg Havalimanı	145	1066
Templin-Groß Dölln Güneş Parkı	128	1038
Brandenburg-Briest Güneş Parkı	91	1066
Eberswalde/Finow Askeri havaalanı	84,5	1043
Finsterwalde Güneş Parkı	80,7	1072
Lieberose Güneş Parkı	53	1062

2.1. GES Beslemeli Dalgıç Pompa Sistem Seçimi

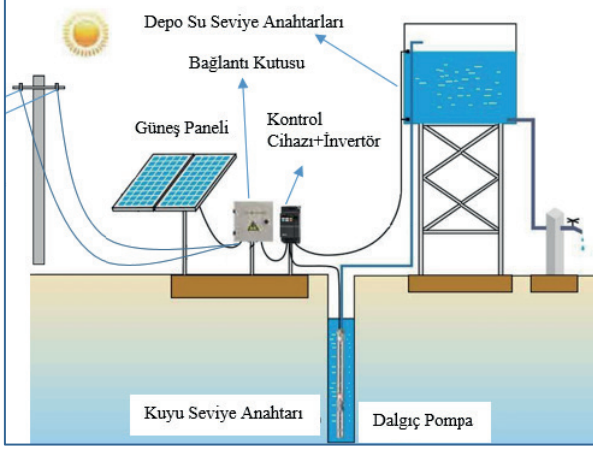
Tarımsal sulama ve içme suyu temini için kullanılan dalgıç pompa sistemleri, sistemin kurulacağı bölgede enerji dağıtım hattının olup olmamasına göre gruplandırılırlar. Alışık akım (AC) sistemde çalışan dalgıç pompalar; genellikle elektrik dağıtım şebekesinin bulunduğu bölgelerde kullanılırlar. Böylece dağıtım şebekesine bağlı (on-grid) fotovoltaik sistemler kurulabilir. Doğru akım (DC) sistemde çalışan dalgıç pompalar ise; genellikle elektrik dağıtım şebekesinin bulunmadığı, yani şebekeden bağımsız (off-grid) sistemlerde tercih edilir. Her iki durumda da bakım masrafları ve maliyet açısından bataryasız sistem öngörülmüştür (Şekil 2).

Şebeke bağlantılı fotovoltaik sistem, üretilen elektrik enerjisini bataryalarda depolamak yerine üretim yerinde tüketilmesi prensibine dayalı çalışmaktadır. Fotovoltaik etki ile modüller üzerinde üretilen doğru akım, evirici yardımıyla alışık akıma dönüştürülür ve elektrik dağıtım şebekesine bağlanır. Eğer güneş panellerinin ürettiği elektrik enerjisi yetersizse, ihtiyaç duyulan enerji şebekeden karşılır. Hem üretilen hem de tüketilen enerji çift yönlü sayaç yardımıyla ölçülür ve belli dönemlerde ilgili dağıtım şirketiyle mahsuplaşmaya gidilir.

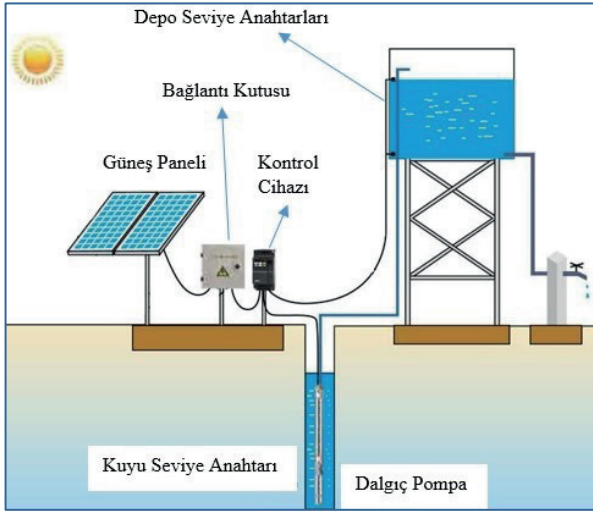
Dağıtım şebekesinden uzak bölgelerde DC dalgıç pompalar tercih edilir. GES beslemeli DC dalgıç pompa sisteminde eviriciye gerek yoktur. Bu haliyle hem maliyet hem de kurulum kolaylığı açısından yapılabirliği yüksek bir yatırım elde edilir. Çok derin kuyularda DC dalgıç pompa motor kullanımı, verim açısından uygun değildir. Ancak, derin olmayan su kuyuları ve su kanalları ile 3 kW güce kadar olan uygulamalarda, ideal bir sistem olarak karşımıza çıkmaktadır [19].

Off-grid sistemler; evirici kayıpları olmadığından, on-grid sistemlere göre daha verimli çalışmaktadır. Her iki sistemde de su temininin sürekliliğini sağlamak önemli olduğundan, su tankı kullanılması zorunludur. Bununla birlikte; off-grid sistemlerde güneşsiz günler de göz önüne alındığında, kesintisiz su temini için su tankı gereksiminin daha büyük

seçilmesi uygun olacaktır. Düzce ve çevresinde bulunan içme suyu sondaj kuyularının köy yerleşim alanlarına yakın olması, bu sondaj kuyularına yakın enerji dağıtım hatlarının bulunması ve ortalama güneşlenme süresinin 5.8 saat olması nedeniyle bu çalışma kapsamında on-grid PV sistemin fayda-maliyet çözümü yapılmıştır.



(a)



(b)

Şekil 2. GES beslemeli (a) on-grid ve (b) off-grid dalgıç pompa sistemi [20]

2.2. Su tüketim çözümlemesi ve dalgıç pompa özellikleri

Bir bölgenin su tüketim hesabı yapılırken, kurulacak su iletim hattına göre 20 veya 30 yıl sonraki nüfus göz önüne alınır. Düzce İl Özel İdaresi Çevre Koruma ve Kontrol Müdürlüğünün 2019 yılı verilerine göre, Düzce ilinde 75'i aktif toplam 83 tane sondaj kuyusu bulunmaktadır. Bu tesislerde genelde 7,5-15 kW aralığında değişen dalgıç pompalar kullanılmaktadır. 2018 TÜİK verilerine göre; Düzce'de sondaj kuyularından su temini yapılan köylerin çoğunda, nüfus 1000 kişi civarındadır. Bu nedenle; GES beslemeli dalgıç pompa sisteminin fayda maliyet çözümlemesinin daha anlamlı olması için, nüfusu 1000 kişi ve üzeri olan yerleşim yerleri göz önüne alınmıştır.

Tablo 2. Su tüketim çözümlemesi [22]

İhtiyaç Türleri	Nüfus (A)	Birim İhtiyaç (lt/gün) (B)	Toplam İhtiyaç (lt/gün) (AxB)	[(AxB)/(24x60x60)]	Mevcut Durum (lt/sn)	Gelecek Durum (lt/sn)
					(a)	(b)
Görevsel İhtiyaçlar	Mevcut	1.000	179	179.000	2,0718 (a)	2,2998 (a+f+g+h) (Y)
	20 yıl sonra	1.245	179	22.804	2,5788 (b)	
	30 yıl sonra	1.375	179	246.114	2,8485 (d)	
	Büyükbaş	250	50	12.500	0,1447 (f)	
	Küçükbaş	250	15	3.750	0,0434 (g)	
Askeri Birlik	-	500	-	0 (h)		
Özel İhtiyaçlar	Tavuk	1.250	0,15	188	0,0022 (j)	0,0069 (g+k+m+n+p) (X)
	Hindi	300	0,70	210	0,0024 (k)	
	Ördek	250	0,80	200	0,0023 (m)	
	Yatılı Okul (Öğrenci)	-	500	-	0 (n)	
	Sağlık Ocağı (Yatak Adedi)	-	250	-	0 (p)	
Toplam İhtiyaç (lt/sn)					2,2668 (X+Y)	3,0435 (Z+W)
					Mevcut Durumda	30 Yıl Sonra

Düzce ilinin günlük kişi başına su tüketim miktarı (litre/kişi-gün) 179 litredir [21]. Tüketim miktarı belirlenirken köydeki büyükbaş, küçükbaş, tavuk, hindi, ördek gibi olası hayvan sayıları da göz önüne alınmıştır. Ayrıca söz konusu bölgede yatılı bölge okulu, askeri birlik, sağlık ocağı gibi tesislerin olmadığı düşünülmüştür. Ayrıntılı su tüketim çözümlemesi Tablo 2'de görülmektedir. Buna göre bölgenin günümüzdeki su tüketim miktarı 2,2668 (8,2 m³/h)'dir. 30 yıl sonra ise 3,0435 (10,9 m³/h) olacağı hesaplanmıştır [22]. 20 ve 30 yıl sonraki nüfus hesaplanırken Tablo 3'den faydalanılır. En son nüfus sayımı 2017 yılında yapıldığından, 2019 yılı nüfusu belirlenirken t değeri 2 olarak alınmıştır. Gelecek yıla ait nüfus hesabı denklem (1) ile yapılır.

$$N_{Gelecek} = Nx(1 + P)^2 \quad (1)$$

Tablo 3. Gelecek yıllarda olabilecek kestirimi nüfus miktarı [20]

2017 yılındaki nüfus	N	1000
Son Nüfus Sayımından Bu Zaman Kadar Artan Nüfus Miktarı/100	P	0,01
Son Nüfus Sayımından Geçen Süre (yıl)	t	2
Birim İnsan İh.(100-201 Lt/Gün)		179
Gelecek Nüfus	N20	1245
	N30	1375
Varolan Nüfus	M	1030

30 yıl sonrası için su deposunun sığası V , eşitlik (2)'den hesaplanır. Burada Q_{ih} 30 yıl sonra ihtiyaç duyulacak su miktarı, F (m³) olası yangın için ihtiyaç duyulan su miktarıdır. Formüldeki değişmez 3 değeri, suyun depolanma zamanı ile ilişkilidir. Nüfusu 1000 kişiden fazla olan yerlerde, F değeri 36 m³ alınmalıdır [20]. Buna göre gerekli olan su deposu hacmi 123,65 m³'tür.

$$V = \frac{Q_{ih} \times 8640}{3 \times 1000} + F \quad (2)$$

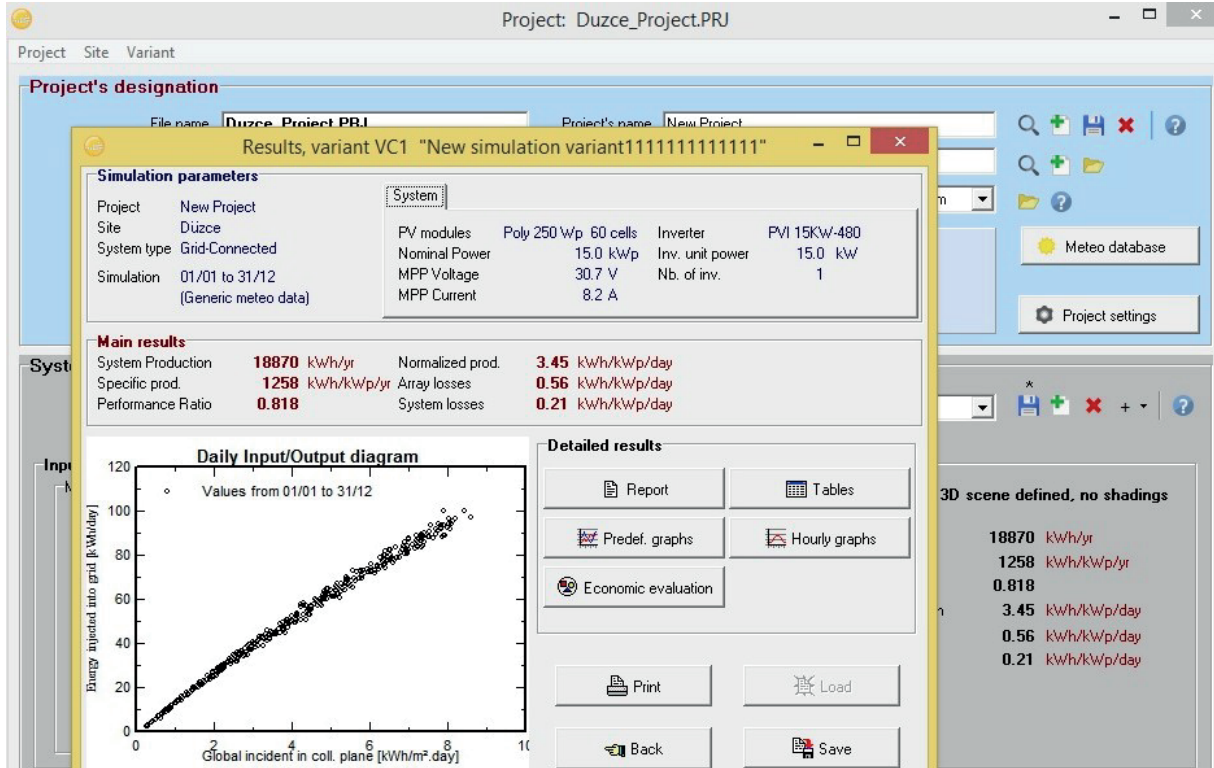
Tablo 4. 9 kW ($p_d = 21,6 \text{ m}^3/\text{h}$) güçteki dalgıç pompaya ait etiket değerleri

Sarım Şekli	Y	Anma Gerilimi (V)	380
Motor Gücü (kW)	9	Kalkış (Is/In-Kalkış Akımı/Nominal Akım)	4,5
Motor Gücü (HP)	12,5	Devir Hızı (devir/dakika)	2880
Güç Faktörü (Cos ϕ)	0,83	Eksenel Yük (kN)	25
Anma Akımı (In)	20,5	Motor Boyu (Mil Boyu Hariç) (mm)	790

Günümüzde farklı türde pek çok dalgıç pompa kullanılmaktadır [23]. Dalgıç pompalarda su basma yüksekliği arttıkça debi azalmaktadır. Aynı debi için, su basma yüksekliği artarsa seçilecek pompa motorun gücü artırılmalıdır. Bu çalışmada Düzce ili güneşlenme süresi göz önüne alınarak pompa seçimi yapılmıştır. 6 lt/sn ($p_d = 21,6 \text{ m}^3/\text{h}$) özellikli 11 kW güçteki bu dalgıç pompası, 90 metre yüksekliğe su basabilmektedir (Tablo 4). Buna göre $123,65 \text{ m}^3$ lük bir depoyu doldurmak için pompanın çalışma süresi t_p , 5,72 olarak hesaplanır (3). Bu süre, Düzce'nin ortalama güneşlenme süresine yakın ve altındadır. Seçilen pompa anma değerlerinde çalışırken, motorunun giriş gücü $P_p = 13328,13 \text{ W}$ 'tır. Seçilen pompa; boş bir depoyu doldururken, 76,3 kWh enerji harcayacaktır (4).

$$t_p = \frac{V}{p_d} \quad (3)$$

$$W = P_p \cdot t_p \quad (4)$$



Şekil 3. PVsyst programı ekran görüntüsü

15 kWp güçteki GES için, PVsyst kütüphanesindeki 250W gücündeki polikristal panel seçilmiştir. Şebeke bağlı olarak planlanan GES'in koordinatları girilmiş ve sistemin yıllık

3. GES Üretim Analizi

Bir GES'in ekonomik çözümlemesinin iyi yapılabilmesi için, yıllık enerji üretiminin doğru hesaplanması gerekmektedir. Bu çalışmada üretim verilerinin kestirimi, iki ayrı yöntem kullanılarak yapılmıştır. Birinci yöntem, yazında da onaylanmış PVsyst programı kullanmaya dayanır [24]-[26]. İkinci yöntemde, farklı disiplinlerde de kullanılan istatistiksel bir yöntem (eğri uydurma yöntemi) kullanılmıştır. Bu yöntemde, varolan bir GES'in verileri göz önüne alınmıştır.

3.1. PVsyst ile Üretim Kestirimi

PVsyst; fotovoltaik sistemlerin boyutlandırılmasını, benzetim ve veri çözümlemesini yapılabilen bir paket programdır. Birçok farklı kaynaktan elde ettiği verileri bulundurduğu gibi, Meteororm programının verilerini de alabilmektedir. Ayrıca, şebekeye entegre ve şebekeden uzak sistemler modellenebilmektedir. PVsyst programı kullanılırken; tesisin kurulacağı yerdeki meteorolojik veriler, ayrıntılı güneş ışınım değerleri, gölgelenme ve bulutlu gün sayılarına ilişkin çözümlemeler, bölgenin kirlilik oranı, kullanılacak güneş panelleri ve eviricinin bazı özellikleri vb. gibi ayrıntıların göz önüne alınması gerekir [27]. Şekil 3'te; PVsyst programında hesaplanan, Düzce'de 15 kWp güçteki bir fotovoltaik tesisin yıllık elektrik üretim eğrisi görülmektedir. Bunun için PVsyst'e girilen değişmezler ise Tablo 5'te verilmiştir.

üretimi 18870 kWh/yıl olarak bulunmuştur. Meteorolojik veri olarak, program veri tabanı göz önüne alınmıştır.

Tablo 5. PVsyst programına girilen değişmezler

Azimut açısı	0°
Koordinatlar	31,17° Doğu-40,35° Kuzey
Yansımaya (Albedo) değeri	0,20
Ortalama rüzgâr hızı	2,3 m/s
Tozlanma kaybı	%1,5
Ufuk çizgisi	Görünür ve açık
PV Panel (60 adet)	250 W Generic Poly 250 Wp
Evirici (1 adet)	Solectria PVI 15kW-480

3.2. Eğri Uydurma Yöntemi ile Üretim Kestirimi

İstatistik biliminin en önemli konularından birisi regresyon çözümleridir. Regresyon çözümlerinde; herhangi bir bağımlı değişkenin bir veya birden fazla bağımsız değişkenle aralarındaki ilişki, matematiksel bir fonksiyon biçiminde ifade edilir ve bu fonksiyon regresyon denklemi adı alır. Regresyon denklemi sayesinde, bağımsız değişkenlerin farklı değerlerine karşılık, bağımlı değişkenin alacağı değerler kestirim edilir.

Eğri uydurma problemlerinin çözümünde regresyon teknikleri sıklıkla kullanılır. Araştırma ile ilgili bilinen parametrelerden yola çıkarak, bu parametreler için bir regresyon modeli geliştirilebilir. Bu çalışmada, çok terimli regresyon modeli ile kestirim yöntemi uygulanmıştır. Çok terimli regresyon modelinde, veriler arasında doğrusal olmayan bir ilişki vardır. k . dereceden bir eğri uydurma yapılacaksa, $k + 1$ tane doğrusal denklem takımı çözmek gerekir. k . dereceden bir çokterimli, denklem 5'te verilmiştir. Buradaki $a_0, a_1 \dots a_k$ bağıntıları çokterimli katsayılarıdır.

$$P_k(x) = a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot x^2 + \dots + a_k \cdot x^k \quad (5)$$

Yanılgıların en küçük olabilmesi için yanılgıların karelerin türevleri alınır ve sıfıra eşitlenir. Böylece çokterimli katsayılarını bulmak için gerekli denklem takımları bulunur (6).

$$S_r = \sum_{i=1}^n (y_i - a_0 - a_1 \cdot x_i - a_2 \cdot x_i^2 - \dots - a_k \cdot x_i^k)^2$$

$$\frac{\partial S_r}{\partial a_0} = 0 \rightarrow a_0 n + a_1 \sum x_i + a_2 \sum x_i^2 + \dots + a_k \sum x_i^k = \sum y_i$$

$$\frac{\partial S_r}{\partial a_1} = 0 \rightarrow a_0 \sum x_i + a_1 \sum x_i^2 + \dots + a_k \sum x_i^{k+1} = \sum x_i y_i$$

$$\frac{\partial S_r}{\partial a_2} = 0 \rightarrow a_0 \sum x_i^2 + a_1 \sum x_i^3 + \dots + a_k \sum x_i^{k+2} = \sum x_i^2 y_i$$

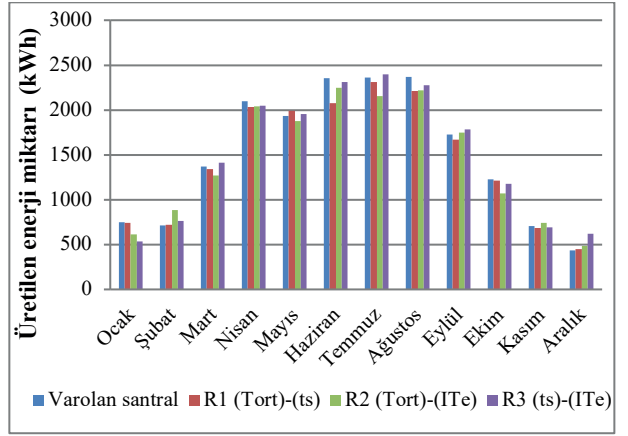
$$\dots$$

$$\frac{\partial S_r}{\partial a_k} = 0 \rightarrow a_0 \sum x_i^k + a_1 \sum x_i^{k+1} + \dots + a_k \sum x_i^{2k} = \sum x_i^k y_i \quad (6)$$

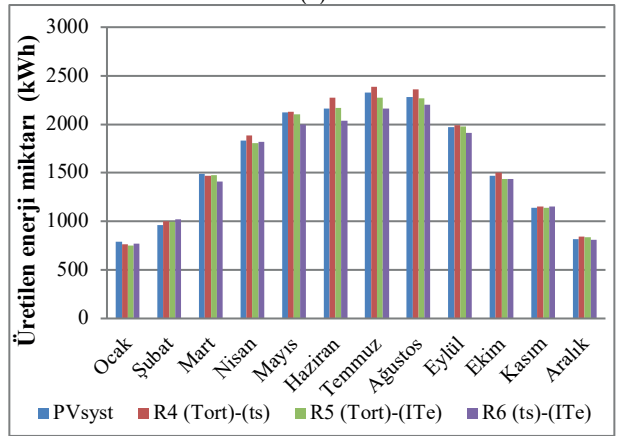
Kestirim yöntemi kullanılırken, varolan GES'den elde edilen elektrik üretim verileri ve PVsyst program çıktıları kullanılmıştır. Sıcaklık ortalaması (T_{ort}) - güneşlenme süresi (t_s), sıcaklık ortalaması (T_{ort}) - ışınım düzeyi (I_{Te}),

güneşlenme süresi (t_s) - ışınım düzeyi (I_{Te}) şeklinde her seferinde iki farklı değişken göz önüne alınarak regresyon modelleri elde edilmiş ve üretim miktarları (R1-R6) Şekil 4'teki gibi hesaplanmıştır.

Bu çalışmada PVsyst programı, varolan 15 kWp'lik GES verileri ve eğri uydurma (regresyon çözümlerisi) ile elde edilen aylık üretim verilerinin (R1-R6) ortalaması alınarak yıllık üretim kestirimi 18606,24 kWh olarak belirlenmiştir. Fayda-maliyet çözümlerisi, bu enerji değeri üzerinden yapılmıştır.



(a)



(b)

Şekil 4. Varolan santral (a) ve PVsyst programı (b) verilerine göre regresyon modelleri ile elde edilen üretim miktarları

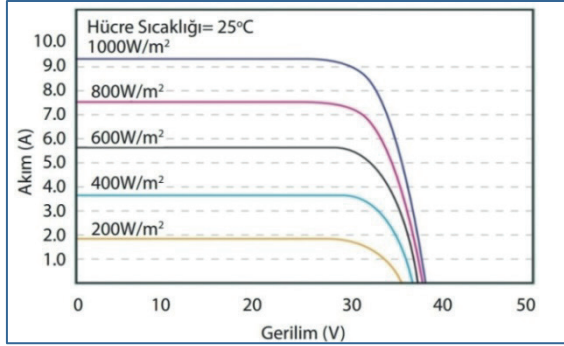
4. Fayda-Maliyet Çözümlemesi

Ülkemizde yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik enerjisi üretimini desteklemek için, 29.12.2010-09.05.2019 tarihleri arasında *Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına İlişkin Kanun* uygulanmıştır. Bu kanun kapsamında; fotovoltaik güneş enerjisine dayalı üretim tesislerinde, üretilen enerjinin birim fiyatı 13,3 cent/kWh olarak belirlenmiştir. 09.05.2019 tarih ve 1044 sayılı Cumhurbaşkanlığı Kararı ile gereksinim fazlası üretim fiyatı; (EPDK) tarafından duyurulan kendi abone grubundaki perakende tek zamanlı enerji bedeline bağlanmıştır. 01/07/2019 tarihi itibarıyla alçak gerilim abonelerinde ticarethane grubu için bu bedel, 47,109 kuruş olarak açıklanmıştır. Fayda-maliyet çözümlerisinde, bu güncel fiyatlar göz önüne alınmıştır.

4.1. Tesis Yatırım Maliyeti

GES ile ilgili olarak yatırım bedelini oluşturan ana öğeler; proje yönetimi ve mühendislik giderleri, makine ve teçhizatlar, lisans bedeli, sahanın hazırlanması ve kazılması, trafo ve enerji besleme kablosu, kurulum ve işletmeye alma ve öngörülemeyen giderler olarak gösterilebilir.

Bu çalışma ile planlanan 15kWp gücündeki GES’de, SPE270 polikristal fotovoltaik panel kullanımı planlanmıştır. 1000 W/m² ışınım seviyesinde, 270 W tepe gücü verebilen panelin akım-gerilim özgeçirisi Şekil 5’de verilmiştir. Şebekeye bağlı evirici olarak; anma gücü 15 kW olan, trafosuz 3 fazlı bir aygıt (Fronius Symo 15.0-3-M) seçilmiştir. Seçilen evirici, 200-800 V DA gerilim aralığında en büyük güç izleyebilmektedir. En büyük DA panel çıkış gücü ise 22,5 kW’tır. Bu verilere göre seçilen evirici, kullanılacak fotovoltaik dizi ile uyumludur. Evirici çıkışı 3 faz 380 V, 21,7 A ve 15 kWp gücündedir. Dalgıç pompanın özellikleri (Tablo 4) incelendiğinde, istenilen anma akımını (20,5 A) karşıladığı ve uyumlu olduğu görülmektedir.



Şekil 5. SPE270 Polikristal fotovoltaik panelin ışınım düzeyine göre akım-gerilim eğrisi [28]

Sulama amaçlı Düzce kırsalına kurulacak GES beslemeli dalgıç pompa sistemi için; köye ait arazilerin kullanılması planlandığından, arazi bedeli ön görülmemiştir. 9 Mayıs 2019 tarihi temelinde; mesken abonelerinde lisansız üretim üst sınırı 10 kW (10 kW dahil), diğer tesislerde ise 5 MW güce kadar çıkartılmıştır. Köylerde içme suyu temini için yapılacak tesislerde lisans alma zorunluluğu olmadığından, herhangi bir lisans başvuru maliyeti hesaba katılmamıştır. Öngörülemeyen giderler olarak da toplam giderin %1,5’i ayrılmıştır. Çeşitli hizmet alımları için sektördeki ilgili firmalarla görüşülerek alınan tekliflerin ortalaması işleme alınmıştır. Buna göre GES yatırım maliyeti, Tablo 6’da belirtilen kalemler üzerinden 15.600 \$ olarak hesaplanmıştır.

4.2. Faaliyet Giderleri

Kurulacak sistemde batarya grubu olmadığından sürekli bakım gideri bulunmamaktadır. GES’de kullanılan donanımların genelde 5 yıllık garanti sürelerinin olması sebebiyle ilk 5 yıl için herhangi bir yenileme gideri düşünülmemiştir. İlk 5 yıldan sonra ise bakım - yenileme gideri olarak makina donanım ve bağlantı yatırım bedelinin % 1’i oranında olacağı kabul edilmiştir [27].

Fotovoltaik modül üzerine düşen güneş ışınlarının en yüksek düzeyde elektriksel güce dönüştürülebilmesi için,

olabildiğince camla kaplı dış yüzeyinin temiz tutulması gerekmektedir. Fotovoltaik panel temizliği özdenetimli aygıtlar ile yada hizmet alımı ile yapılabilir. Ancak Düzce ilinin yağış alma oranının yüksek olması, panel temizleme işleminin uzmanlık gerektiren bir işlem olmaması ve panel sayısının az olmasından dolayı bu işlem için herhangi bir maliyet öngörülmemiştir. Dalgıç pompanın bakım giderlerinin, bakım ve yenileme giderleri kaleminden karşılanması planlanmıştır.

Tablo 6. 15 kWp GES için öngörülen yatırım maliyet kalemleri

İmalatın Cinsi	Miktarı	Birim Fiyatı (\$)	Yaklaşık Maliyet (\$)
Proje Yönetimi ve Mühendislik Giderleri	1 Adet	1.000	1.000
Evirici 15kW	1 Adet	3.000	3.000
PV panel-Polikristal	56 Adet	100	5.600
PV Kablo	100 metre	2	200
Çelik Kontrüksiyon	Muhtelif	3745	3745
Besleme Kablosu	100 metre	1,7	170
Nakliye	Muhtelif	100	100
Montaj/Devreye Alma	Muhtelif	1.200	1.200
Sahanın Hazırlanması ve İnşaat İşleri	Muhtelif	300	300
Öngörülemeyen Giderler	Muhtelif	285	285

4.3. Geri Ödeme Süresi

Geri ödeme süresi, kârlılık ölçüsü olmayıp yalnızca bir zaman kavramıdır. Yapılabilirlik raporlarında geri ödeme süresi kısaltıldıkça, yatırımın daha az risk taşıdığı ve likiditesinin artacağı söylenebilir. T_G geri ödeme süresi denklem (7)’den hesaplanır. Burada T_Y toplam yatırım bedelini, Y_{GE} yıllık net nakit girişini ve Y_{GI} yıllık gideri belirtir.

$$T_G = \frac{T_Y}{Y_{GE} - Y_{GI}} \quad (7)$$

Maliyet kalemlerinin döviz, elektrik enerjisi bedelinin ise TL cinsinden olması nedeniyle kur dönüşümü yapılmalıdır. 19.01.2009 tarihindeki bir Amerikan Doları 1,55 TL iken 19.06.2019 tarihinde ise bir Amerikan Doları 5,85 TL’dir. Yani 10 yıllık süreçte yıllık bazda Dolarda %14,2’lik, Euro’da %11,8’lik bir artış görülmüştür. 01.01.2009 tarihinden itibaren uygulanan tarifelerle ilgili 25.12.2008 tarih ve 1905 sayılı kurul kararına göre, perakende tek zamanlı ticarethane grubuna ait elektrik enerjisi birim fiyatı 19.997 kuruştur. 01.07.2019 tarihinden itibaren uygulanacak tarifelerle ilgili 27.06.2019 tarih ve 8689 sayılı kurul kararına göre ise, perakende tek zamanlı ticarethane grubuna ait elektrik enerjisi birim fiyatı 47,109 kuruştur. Yani yaklaşık 11 yıllık süreçte yıllık bazda %10’luk bir artış gösterdiği görülmektedir. 09.05.2019 tarih ve 1044 sayılı Cumhurbaşkanlığı Kararı’nda ilk 10 yıl için güneş enerjisinden elde edilen elektrik enerjisinin birim fiyatı belirlenmiş iken, 10. yıldan sonra uygulanacak birim fiyat tarifesi hakkında herhangi bir ayrımı

bulunmamaktadır. Bu nedenle ilk 10 yıldan sonra uygulanacak elektrik enerjisinin birim fiyatını öngörmek için; 2009-2019 yılları arasında uygulanan elektrik birim fiyatında meydana gelen yıllık ortalama %10'luk artış oranı göz önüne alınmıştır. Ayrıca bu bedele, Enerji Piyasaları İşletme Anonim Şirketinin 31.05.2018-31.05.2019 tarihleri arasındaki YEKDEM elektrik enerjisi pozitif dengesizlik fiyat ortalaması (0,25 TL/kWh) da ilave edilmiştir. Böylelikle 11 inci ve 25 inci yıllar arasındaki birim fiyatlar bulunup üretim gelirleri hesaplanmıştır. Ayrıntılı fayda-maliyet çözümlemesi Tablo 7'te verilmiştir.

Tablo 7. Güncel kanun ve verilere göre 15 kWp gücündeki bir PV sisteminin fayda maliyet çözümlemesi

Yıl	Yıllık PV Panel Verimlilik Kaybı	Enerji Üretimi kWh/Yıl	Yıllık Elektrik Üretim Geliri (TL)	Yatırım Bedeli (TL)	Bakım Onarım Gideri (TL)	Beklenmeyen Gider TL (%1,5)	Makine ve Teçhizat Amortisman (%10)	Yatırımın Geri Dönüşü
1	0	18606	8765	107686		-1615,3	-5122	-105658
2	0,99	18420	9545				-5122	-101234
3	0,98	18234	10394				-5122	-95962
4	0,97	18048	11316				-5122	-89767
5	0,96	17862	12320				-5122	-82569
6	0,95	17676	13410		-512		-5122	-74793
7	0,94	17490	14596		-589		-5122	-65907
8	0,93	17304	15885		-677		-5122	-55821
9	0,92	17118	17286		-779		-5122	-44436
10	0,91	16931	18808		-896		-5122	-31646
11	0,9	16745	10858		-1030			-21817
12	0,89	16559	11811		-1185			-11191
13	0,88	16373	12847		-1362			294
14	0,87	16187	13971		-1567			12698
15	0,86	16001	15191		-1802			26087
16	0,85	15815	16516		-2072			40531
17	0,84	15629	17954		-2383			56102
18	0,83	15443	19514		-2740			72876
19	0,82	15257	21207		-3151			90931
20	0,81	15071	23043		-3624			110350
21	0,8	14885	25034		-4167			131217
22	0,79	14699	27194		-4793			153618
23	0,78	14513	29534		-5511			177641
24	0,77	14327	32071		-6338			203374
25	0,76	14141	34820		-7289			230905

5. Sonuç

Bu çalışmada; Düzce ilinde bulunan sondaj kuyularından su temini için, 15 kWp gücünde fotovoltaik güç sistemi tasarlanmıştır. Bunun için Düzce ili güneş enerji potansiyeli 4 farklı veri tabanı göz önüne alınarak belirlenmiştir. Panel gücü kırsal bölgenin 30 yıllık su gereksinimleri belirlenerek yapılmıştır.

Tasarlanan GE sistemin üretim kestirimi yazındaki çalışmalardan farklı olarak; PVsyst programı, varolan GES verileri ve eğri uydurma (regresyon çözümlemesi) yöntemi ile yapılmıştır. Ay bazında üretim kestirimlerinde küçük farklar görülmektedir. Bu nedenle yaklaşık üretim kestirimi, bu verilerin ortalaması alınarak, 18604,24 kWh/yıl olarak hesaplanmıştır.

Fayda maliyet çözümlemesinde 09.05.2019 tarih ve 1044 sayılı Cumhurbaşkanlığı Kararı ile belirlenen güncel alım bedeli göz önüne alınmıştır. Kurulum ve bakım giderleri göz önüne alınarak yapılan fayda-maliyet çözümlemesinde, tesis yatırımının geri dönüş süresi 12 yıl olarak hesaplanmıştır. Her ne kadar Düzce ilimiz, Türkiye ortalamasının altında bir GE gizilgücü olsa da; sistemin kullanım ömrü göz önüne alındığında, Düzce ili su temini için GES kullanımının akılcı olduğu sonucuna varılmıştır.

Bu çalışmanın; ülkemizin kuzey bölgelerinde GE gizilgücünün yetersiz olduğu algısını kırması ve ülkemizin tüm bölgelerinde kurulabilecek diğer dalgıç pompa sistemlerinin planlanmasına örnek olması beklenmektedir.

Kaynaklar

- [1] Cebeci, S., "Türkiye'de güneş enerjisinden elektrik enerjisi üretim potansiyelinin değerlendirilmesi", Uzmanlık tezi, İktisadi Sektörler ve Koordinasyon Genel Müdürlüğü, T.C. Kalkınma Bakanlığı, yayın no: 2977, Ankara, Türkiye, 2017.
- [2] Türkiye Elektrik İletim A.Ş., "Kurulu güç raporu-ağustos 2019", (2019, 19 Eylül). [Online]. Erişim: <https://www.teias.gov.tr/sites/default/files/2019-09/KURULU%20G%C3%9C%C3%87%20%C4%B0NTERNET%20%28A%C4%9EUSTOS%20AYI%20SONU%20%C4%B0T%C4%B0BAR%C4%B0%20%C4%B0LE%29.pdf>
- [3] Gençoğlu, E., "Güneş pili ile çalışan bir su pompa sisteminin tasarımı ve gerçekleştirilmesi", Yüksek lisans tezi, Elektrik Elektronik Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye, 2015.
- [4] Atmaca, M., Yusufoglu, G. ve Kurtuluş, A. B., "Güneş enerjili sulamanın tarım sektöründe uygulaması", *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, c. 3, sayı 2, ss. 142-153, 2014.
- [5] Yılmaz, Ş., Uçan, K., Ketten, M. ve Narin N., "Meyve bahçelerinin sulanmasında güneş enerjisinden yararlanma olanakları", *Neşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi*, c. 5, sayı özel, ss. 169-178, 2016.
- [6] Yılmaz, Ş., Özçalık, H. R., Öter, A. ve Aydoğan, O., "Güneş enerjili tarımsal sulama sisteminin ekonomik analizi", *11. Ulusal Tarım Ekonomisi Kongresi*, Samsun, Türkiye, 2014, c.2, ss. 1113-1119.
- [7] Atay, Ü., Işiker, Y. ve Yeşilata, B., "Fotovoltaik güç destekli sulama sistemi projesi-1: Genel esaslar", *5. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu Bildiriler Kitabı*, Diyarbakır, Türkiye, 2009, ss. 57-62.
- [8] Inman, R. H., Pedro, H. T. C. and Coimbra, C. F. M., "Solar forecasting methods for renewable energy integration", *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 39, no. 6, pp. 535-576, 2013.
- [9] Antonanzas, J., Osorio, N., Escobar, R., Urraca, R., Martínez-de-Pison F. J. and Antonanzas-Torres, F., "Review of photovoltaic power forecasting", *Solar Energy*, vol. 136, pp. 78-111, 2016.

- [10] Alfadda, A., Adhikari, R., Kuzlu, M. and Rahman, S., "Hour-ahead solar PV power forecasting using SVR based approach", *2017 IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference*, Washington DC, USA, 2017, pp. 1-5.
- [11] T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, (2019, 19 Eylül). [Online]. Erişim: <https://www.enerji.gov.tr/tr-TR/Sayfalar/Elektrik>.
- [12] Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, (2019, September 19). [Online]. Available: https://www.energy-charts.de/energy_pie.htm?year=2018.
- [13] European Commission Joint Research Centre. (2019, May 17). *Photovoltaic geographical information system (PVGIS)*. [Online]. Available: <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>.
- [14] Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü. (2019, 17 Mayıs). *Türkiye güneş enerjisi potansiyel atlası*. [Online]. Erişim: <http://www.yegm.gov.tr/MyCalculator/Default.aspx>.
- [15] Anonim. (2019, May 17). [Online]. Available: <https://meteonorm.com/>.
- [16] Anonim. (2019, May 20). [Online]. Available: <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>.
- [17] Anonim. (2019, May 20). [Online]. Available: <https://solarfeeds.com/wiki/solar-energy-in-germany/>.
- [18] Castro C.D., Mediavilla M., Miguel L.J., Frechoso F., "Global solar electric potential: A review of their technical and sustainable limits", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 28, pp. 824-835, 2013.
- [19] Anonim. (2019, 11 Mayıs). [Online]. Erişim: <https://liderlerenerji.com/solar-sulama-sistemleri>.
- [20] Anonim. (2019, 11 Mayıs). [Online]. Erişim: <https://deryasolar.com.tr/urunler/tarimsal-sulama-sistemleri/>
- [21] Türkiye İstatistik Kurumu, (2019, 23 Eylül). *Kişi başı çekilen günlük su miktarı (litre/kişi-gün)-2016*. [Online]. Erişim: <https://biruni.tuik.gov.tr/medas/?kn=121&locale=tr>.
- [22] Su Getirme Etüt ve Proje Bilgisi, Etüt ve Proje Dairesi Başkanlığı-T.C. Başbakanlık Köy Hizmetleri Genel Müdürlüğü, Ankara, Türkiye, 2000, ss. 16-19.
- [23] Sarıgül A., "Santrifüj Pompalarda Enerji Verimliliği" Yüksek lisans tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2010.
- [24] Bektaş Ekici, B., Gülten, A., "Elazığ ili için şebeke bağlantılı bir fotovoltaik sistemin performans analizi", *2nd. International Sustainable Buildings Symposium*, Ankara, Türkiye, 2015, ss. 848-853.
- [25] Sauer, K. J., Roessler, T. and Hansen, C. W., "Modeling the irradiance and temperature dependence of photovoltaic modules in PVsyst", *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 5, no. 1, pp. 152-158, 2015.
- [26] Yadav, P., Kumar, N. and Chandel, S. S., "Simulation and performance analysis of a 1kWp photovoltaic system using PVsyst", *2015 International Conference on Computation of Power, Energy, Information and Communication*, Chennai, India, 2015, pp. 358-363.
- [27] Girgin, M. H., "Bir fotovoltaik güneş enerjisi santralının fizibilitesi, Karaman bölgesinde 5 MW'lık güneş enerjisi santrali için enerji üretim değerlendirmesi ve ekonomik analizi", Yüksek lisans tezi, Enerji Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2011.
- [28] Schmid-Pekintas Enerji, "Polikristal SPE 270 fotovoltaik paneli", (2019, 10 Mayıs). [Online]. Erişim: <http://www.schmid-pekintas.com/poly.pdf>.

Ali YILDIZ



Ali YILDIZ, 2005 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi Elektrik Mühendisliği Bölümünden lisans derecesini, 2019 yılında Düzce Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümünden yüksek lisans derecesini almıştır. Halen Düzce Üniversitesi Elektrik Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Bölümünde doktora programına devam etmektedir. 2005-2009 yıllarında Çanakkale Bayındırlık ve İskân Müdürlüğünde Mühendis, 2009-2014 yıllarında Türkiye Elektrik İletim A.Ş. Genel Müdürlüğünde Mühendis, 2014-2015 yıllarında Türkiye Atom Enerjisi Kurumunda Atom Enerjisi Uzman Yardımcısı olarak görev yapmıştır. 2015 yılından itibaren Düzce İl Özel İdaresinde Yüksek Mühendis olarak görev yapmaktadır. Araştırma alanları arasında nükleer enerji, yenilenebilir enerji kaynakları, güç trafoları, elektrik makinaları ve enerji kalitesi bulunmaktadır.

Emin YILDIRIZ



Emin YILDIRIZ, 2004 yılında Gazi Üniversitesi Elektrik Elektronik Eğitimi Bölümünden ve 2014 yılında Cumhuriyet Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümünde lisans derecelerini, 2008 yılında Gazi Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümünden yüksek lisans derecesini almıştır. 2014 yılında Samsun Ondokuz Mayıs Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Elektrik Makinaları Anabilim Dalından doktora derecesini almıştır. 2005-2014 yılları arasında Cumhuriyet Üniversitesinde Öğretim Görevlisi olarak görev yapmıştır. 2015 yılından beri Düzce Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümünde öğretim üyesi olarak görev yapmaktadır. Çalışma alanları geleneksel ve sıradışı sürekli mıknatıslı senkron makine tasarımı, yenilenebilir enerji kaynakları, kablosuz güç aktarımı sistem tasarımı ve geliştirilmesi, Sezgisel elektromanyetik sistem geliştirme üzerinedir.

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" alarak 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 Sorumluluğu 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.