

## Effect of Design on Bone Tissue Scaffolds Produced via 3D Printer

 Deniz EKMEKÇİOĞLU<sup>1\*</sup> , Ceren PEKŞEN<sup>2</sup> 
<sup>1</sup>Ondokuz Mayıs University Faculty of Fine Arts, Department of Industrial Design, 55100, İlkadım, SAMSUN

<sup>2</sup>Ondokuz Mayıs University Faculty of Fine Arts, Department of Ceramic and Glass, 55100, İlkadım, SAMSUN

### Graphical/Tabular Abstract

#### Article info

Research article  
 Received:18/10/2020  
 Revision:25/12/2020  
 Accepted:18/01/2021

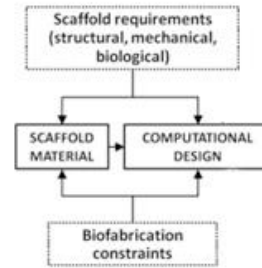
#### Highlights

- Bioceramics Production.
- 3D printer Technology.
- Bone Tissue Design.

#### Keywords

3D printer  
 Bioceramics  
 Design  
 Bone Tissue Scaffold

In this study, the use of polymers and bioactive ceramics together in biomaterials designed for bone tissue engineering applications was discussed to successfully imitate bone tissue structure. In this context, as technologies such as three-dimensional printing develop, considering the advances in the ability to control bone microarchitecture, the effect of these technologies on the production of bone tissue scaffolds has been examined.



**Figure A.** Flowchart of the early key steps in the design of scaffolds.

**Purpose:** In this study, bone tissue scaffolds structures and their production with 3D printers are examined. Production techniques with 3D printers were examined and the effects of biomaterials on the designs of bone tissue scaffolds were discussed.

**Theory and Methods:** Design effect of bone tissue scaffolds produced with 3D printer is explained step by step. Firstly, bioactive ceramics, which are widely used as bone tissue scaffolds, were mentioned, and then 3D printer technology was described as a production technique. After the requirements for biologically designing a scaffold were laid out, the comparison table of various 3D printer techniques used to print scaffolding in tissue engineering was examined along with advantages and disadvantages.

**Results:** Many production techniques have been used in the design of tissue scaffolds. However, most of these scaffolds have significant disadvantages with their geometric constraints and / or material properties of the final textured material. In this context, biological justifications are added to the design parameters. Considering the chemical structures of bioactive ceramics and the resulting product and production technology allowed by this material category, experimental methods can be constructed in the design of different tissue scaffolds because of these constraints.

**Conclusion:** Bone is a natural composite structure, and materials to be used as tissue scaffolds should also have biocompatible and mechanically similar properties to bone tissue. New bone formation has been achieved with the production of composite biomaterials containing natural and synthetic polymers and bioceramics.

Different methods have been used in the production of bone scaffold according to printing principles and material types, but with the development of technologies such as three-dimensional printing, the opportunity to control bone microarchitecture has emerged. 3D printers open up new possibilities for bone scaffold design, the design process and the test phases.



## Effect of Design on Bone Tissue Scaffolds Produced via 3D Printer

Deniz EKMEKÇİOĞLU<sup>1\*</sup>, Ceren PEKŞEN<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ondokuz Mayıs University Faculty of Fine Arts, Department of Industrial Design, 55100, İlkadım, SAMSUN

<sup>2</sup>Ondokuz Mayıs University Faculty of Fine Arts, Department of Ceramic and Glass, 55100, İlkadım, SAMSUN

### Abstract

The design of the bone scaffolds changes and develops with the developing technology and production methods. Degenerative diseases which are one of the design needs like osteoporosis, result in bone pathologies such as, degeneration and loss of bone tissue, adversely affecting quality of life and living standards. Therefore, the development of three-dimensional bioactive bone tissue scaffolds for bone regeneration come into prominence in tissue engineering. Polymers and bioactive ceramics are used as biomaterials designed for bone tissue engineering applications that bone tissue structure can be successfully imitated. Bone tissue scaffolds produced with hydroxyapatite (HA) and bioactive glasses have a clinical potential for bone regeneration due to their high biocompatibility and binding properties to bone tissue. However, the mechanical properties of HA and bioactive glass bone tissue scaffolds, which are designed to be porous like bone tissue, are not particularly suitable for load bearing applications. HA based composites are produced by adding secondary phases such as ceramic, metal, polymer, and glass to improve the mechanical properties. A variety of manufacturing methods such as stereolithography, powder layered fusion material extrusion, binder jetting and three-dimensional (3D) printing are applied to fabricate bone tissue scaffolds according to the printing principles and selection of materials. Conventional methods offer limited control over pore size, geometry, and interdependence for this production. However, 3D printing technologies have evolved, progress has been recorded in the ability to control bone micro-architecture.

### Makale Bilgisi

Araştırma makalesi  
Başvuru: 18/10/2020  
Düzeltilme: 25/12/2020  
Kabul: 18/01/2021

### Keywords

3D printer  
Bioceramics  
Design  
Bone Tissue Scaffold

### Anahtar Kelimeler

3B yazıcı  
Biyoseramikler  
Tasarım  
Kemik Doku İskelesi

### 3B Yazıcıların Kemik Doku İskeleleri Tasarımına Etkisi

#### Öz

Kemik doku iskelelerinin tasarımı gelişen teknoloji ve üretim metodları ile değişmekte ve gelişmektedir. Tasarım ihtiyaçlarından bir tanesi olan dejeneratif hastalıklar sonucu ortaya çıkan osteoporoz nedeni ile kemik dokusu deformasyonu ve kaybı gibi kemik patolojileri, yaşamın kalitesini ve yaşam standartlarını olumsuz etkilemektedir. Bu nedenle kemik rejenerasyonu için üç boyutlu biyoaktif kemik doku iskelelerinin geliştirilmesi, doku mühendisliği alanında büyük önem kazanmıştır. Kemik doku yapısının başarılı bir biçimde taklit edilebilmesinde kemik doku mühendisliği uygulamaları için tasarlanan biyomalzemelerde polimerler ve biyoaktif seramikler kullanılmaktadırlar. Hidroksiapatit (HA) ve biyoaktif camlar ile üretilmiş kemik doku iskeleleri yüksek biyoyumluluğa ve kemik dokusuna bağlanma özelliğine sahip olduğundan dolayı kemik rejenerasyonu için klinik potansiyele sahiptir. Ancak kemik dokusuna benzer gözenekli olarak tasarlanan HA ve biyoaktif cam kemik doku iskelelerin mekanik özellikleri özellikle yük taşıyan uygulamalar için uygun değildir. Mekanik özellikleri iyileştirmek amacıyla seramik, metal, polimer ve cam gibi ikincil fazların ilavesiyle HA bazlı kompozitler üretilmektedir. Kemik iskelesi üretiminde baskı prensipleri ve malzeme seçimine göre stereolitografi, toz tabakalı füzyon, malzeme ekstrüzyonu, binder jetleme ve üç boyutlu (3B) yazıcı ile şekillendirme gibi çeşitli yöntemler uygulanmaktadır. Geleneksel yöntemler; gözenek boyutu, geometrisi ve birbirine bağlılığı üzerinde sınırlı kontrol imkânı sunmaktadır. Ancak 3B yazıcı teknolojileri geliştikçe, kemik mikro mimarisini kontrol edilebilme becerisinde ilerlemeler kaydedilmiştir.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Dejeneratif hastalıklar sonucu ortaya çıkan osteoporoz nedeni ile kemik dokusu deformasyonu ve kaybı gibi kemik patolojileri, yaşamın kalitesini ve yaşam standartlarını olumsuz etkilemektedir. Bu nedenle kemik rejenerasyonu için kemik doku iskelesi temelli doku mühendisliği yaklaşımları büyük önem kazanmıştır. Kemik doku mühendisliği, fiziksel, kimyasal ve mekanik olarak kemik hücre dışı matrisini taklit edebilecek doku iskeleleri ile, vücutta hasarlı ya da işlev göremeyen kemik dokunun rejenerasyonunu veya onarımını amaçlamaktadır. Makroskobik ve mikroskobik ölçekte hiyerarşik bir yapıya sahip olan Kemik dokusu hücrelerin ve diğer organik bileşenlerin yanı sıra, nano boyuttaki inorganik yapılar olan hidroksiapatitlerin (HA) kollajen fiberler üzerine yerleşmesi ile oluşan doğal bir kompozit yapıdır. Doku iskelesi olarak kullanılacak malzemelerin de biyolojik olarak uyumlu, mekanik olarak kemik dokusuna benzer özelliklere sahip olması ve hücre adezyonunu ve çoğalmasını kolaylaştırmak için birbirine bağlı gözeneklerle yapılması gerekmektedir. Araştırmalarda, doğal ve sentetik polimer ve biyoseramiklerin bulunduğu kompozit biyomalzemeler üretilmiş ve yeni kemik oluşumunun gerçekleştiğini gösteren sonuçlar elde edilmiştir [1-5].

Kemik doku yapısının başarılı bir biçimde taklit edilebilmesi için, kemik doku mühendisliği uygulamalar için tasarlanan biyomalzemelerde polimerler ve biyoaktif seramikler bir arada kullanılmaktadırlar. Biyobozunur özellikteki polimerler üç boyutlu yapının elde edilmesini sağlarken, biyoaktif özelliğe sahip seramikler osteoindüktif özellikleriyle kemik rejenerasyonunu hızlandırır [5-7].

Kemik iskelesi üretiminde baskı prensipleri ve malzeme türlerine göre stereolitografi (kütle polimerizasyonu), toz tabakalı füzyon (lazer sinterleme), malzeme ekstrüzyonu (kaynaştırılmış biriktirme imalatı) ve binder jetleme (toz bazlı 3BP) gibi çeşitli yöntemler uygulanmaktadır. Geleneksel yöntemler, gözenek boyutu, geometrisi ve birbirine bağlılığı üzerinde sınırlı kontrol imkânı sunmaktadır. Ancak üç boyutlu baskı gibi teknolojiler geliştikçe, kemik mikro mimarisini kontrol edilebilme becerisinde ilerlemeler kaydedilmiştir [8, 9].

## 2. BİYOAKTİF SERAMİKLER (BIOACTIVE CERAMICS)

Vücudun zarar gören veya işlevini yitiren parçalarının onarımı, yeniden yapılandırılması veya yerini alması için özel tasarımı seramikler geliştirilmiştir. Bu amaçla kullanılan seramikler “biyoseramikler” olarak adlandırılmaktadır. Biyoseramikler, biyo inert ( $Al_2O_3$  ve  $ZrO_2$ ), biyoaktif (hidroksiapatit ve biyoaktif camlar) ve biyobozunur (HA ve trikalsiyumfosfat) olmak üzere üç grupta incelenirler. Biyo inert seramikler doku ile mekanik bağ oluştururken biyoaktif seramikler doku ve implant arasında kimyasal bağ yaparak etkileşirler. Biyoaktiflik biyomalzemenin kemiğe bağlanabilme yeteneğidir. Biyoaktif seramikler blok, gözenekli madde ve granül şeklinde üretilebilirler ve yaygın olarak kemik dolgu malzemesi olarak kullanılmaktadırlar. Biyobozunur seramikler ise doku ile yer değiştirmektedirler [10-12].

Biyoseramikler iskeletteki sert bağ dokusunun tamiri veya yenilenmesinde de yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu malzemelere olan gereksinim, özellikle ilerleyen yaşa bağlı olarak ortaya çıkmaktadır. Kemik yoğunluğu ve dayanımının 30 yaşından itibaren azalması nedeni ile yaşlılarda kemikler çok kırılabilir olur. Bunun sonucunda kemik üreten hücreler, yani osteoblastların yeni kemik üretiminde ve kemikte oluşan mikro çatlakların kapanmasındaki üretkenliği azalmaktadır. Ortalama insan ömrü 80 yıl olarak düşünülürse, 60 yaş civarında bağ dokusu için yedek malzeme gereksinimi başlamakta ve en az 20 yıl boyunca biyoseramiklere ihtiyaç duyulmaktadır [13].

Biyoseramiklerin kullanımını sınırlayan nedenlerin en önemlileri, bazı klinik uygulamalardaki yavaş ilerleyen çatlaklar, yorulma ve değişik darbe ve basınçlara dayanımlarının özellikle yük taşıyan bölgelerde yeterli olmamasıdır. Bu olumsuzlukları önlemek için kullanılan iki yeni yaklaşımdan birisi, biyoaktif kompozitler, diğeri ise biyoaktif seramiklerle yapılan kaplamalardır [11]. Biyoseramikler oksit seramikleri, kalsiyum fosfat seramikleri ve cam ve cam seramikler olarak üç grupta incelemek mümkündür; Oksit seramikler, inert yapıda olan ve oksijen iyonlarının oluşturduğu düzlemde metal iyonlarının dağılması ile oluşan polikristalin seramiklerdir. Oksit seramiklerin Alümina ( $Al_2O_3$ ) ve Zirkonya ( $ZrO_2$ ) olmak üzere iki önemli çeşidi bulunmaktadır [14].

Genel olarak bakıldığında, tek fazlı biyoaktif camlar örneğin biyocam insan kemiği uygulamalarında gerekli mekanik mukavemeti göstermezler. Biyoaktif camların en önemli özelliği çok yüksek reaksiyon hızına sahip olup, doku ile hızlı bir şekilde bağlanmayı sağlamasıdır. En önemli dezavantajları ise düşük mekanik mukavemete ve düşük kırılma tokluğuna sahip olmalarıdır [15-17]. Biyoaktif camlar kolay ve seri üretim için uygun bir teknik olan geleneksel ergitme yöntemi ile üretilebilirler. Bu yöntem ile üretilmelerine rağmen her bir üretim basamağında hassas davranılması gerekmektedir. Bunun sebebi son ürünün insan vücudunda kullanılacak olmasıdır. Kimyasal kirlenmeler minimuma indirilmeli, oksit malzemeler yüksek saflıkta seçilmeli, silika yüksek saflıkta ve flint kalitesinde olmalıdır [14, 18].

Biyoaktif camların kemik dokusu ile güçlü bağ kurabilme yeteneklerinden dolayı hasar görmüş kemik dokusunun tamiri ve onarımında kullanımı gün geçtikçe artmaktadır. Biyoaktif camlar fiziksel solüsyona maruz kaldıklarında silika gruplarının bazıları kalsiyum, fosfor veya sodyum ile yer değiştirebilmektedir ve yüzeylerinde amorf kalsiyum fosfat tabakası oluşmaktadır. Bu tabaka birkaç gün içerisinde kemik içerisindeki mineral faz ile kimyasal ve fiziksel olarak aynı ve yüzeyler arası bağlanma için gerekli olan biyolojik olarak aktif hidroksikarbonatapatit (HCA) tabakasına dönüşerek kristalleşmektedir. Kemiğe bağlanma işlemi 12 reaksiyon basamağı ile gerçekleşmektedir. İlk 5 reaksiyon basamağı dokulara bağlı değildir ve kristalin HCA tabakasının oluşması ile sonuçlanmaktadır. Daha sonraki basamaklarda ise implantın kemik dokusuna bağlanması gerçekleşmektedir. Böylece doku ve implant arasında kimyasal bağlanma gerçekleşmektedir. Aynı zamanda vücuda implant olarak uygulanan biyoaktif camların yüzeyinin temas ettiği kemik dokuyu geliştirdiği bilinmektedir [19]. Ayrıca in vitro çalışmalar biyoaktif camların osteoblast, fibroblast ve endotel hücrelerinin büyümelerini ve olgunlaşmalarını teşvik ettiğini göstermektedir. Yapılan son çalışmalarda biyoaktif camlardan açığa çıkan iyonların osteoblast hücrelerinde hücresel cevapta rol oynayan genleri aktive ederek osteoblast hücrelerinin çoğalmasını ve farklılaşmasını artırdığı tespit edilmiştir [14, 20].

Biyoseramiklerin biyolojik ve mekanik özellikleri kimyasal kompozisyonlarına ve yapılarına bağlıdır ve bu özellikleri üretim yöntemi, farklı element katkıları ve kompozit yapılar oluşturulması ile kolaylıkla değiştirilebilmektedir. Hidroksiapatit, kırılma ve düşük kırılma tokluğundan dolayı zayıf mekanik özelliklere sahiptir ve yük taşıyıcı uygulamalarda kullanımını kısıtlamaktadır. HA bazlı kompozitler (HA-alümina, HA-zirkonya, HA-visker ve HA-biyocam) mekanik özellikleri iyileştirmek amacıyla seramik, metal, visker gibi ikincil fazların ilavesiyle üretilmektedir [9, 14, 21].

Batra ve Kapoor (2010), tarafından yapılan çalışmada cam takviyeli hidroksiapatit kompozitlerin mekanik özellikleri incelenmiş ve ağırlıkça %10 cam ilaveli kompozitlerin HA'dan daha iyi basma mukavemeti ve sertlik değerlerine sahip olduğu görülmüştür [22]. Göller ve ark. (2003) tarafından yapılan çalışmada ise HA'nın farklı sinterleme sıcaklıklarında ağırlıkça %5 ve %10 biyocam takviyesi ile mekanik özelliklerin iyileştirilmesi araştırılmış ve biyocam takviyeli camlarda daha iyi mekanik özellikler saptanmıştır [23].

### 3. ÜÇ BOYUTLU YAZICI TEKNOLOJİSİ (3D PRINTER TECHNOLOGY)

3B yazıcı teknolojisi, otomotiv ve havacılık endüstrilerinde otomobil ve uçak parçalarının prototiplerini üretmek için, mimarlık dünyasında yapısal modellerin basılması için, tüketici ürünleri endüstrisinde prototip geliştirme için kullanılmaktadır [24]. Bu çerçevede tıbbi uygulamalar için de 3B baskı teknolojisi hızla gelişmekte ve sağlık hizmetlerinde oldukça etkili değişimlere yol açmaktadır. Hem günümüzdeki kullanım alanları hem de gelecekteki potansiyel aşamalar için 3B yazıcı, kişiye özel protezlerin, implantların ve anatomik modellerin oluşturulması, ilaç dozaj formlarının yapılandırılması, uygulanması ve keşifleri ile ilgili farmasötik araştırmalarda doku ve organ üretimi dahil olmak üzere çeşitli genişlikteki imkanlara olanak sağlamaktadır [25]. Biyoseramik malzeme, kusurlu dokular için kemik doku iskelelerin üretiminde kullanılmaktadır. Kemik dokusu mühendisliği için en kritik adımlardan biri üretimdir. 3B baskı, kemik doku iskelesi inşası için yüksek kontrol edilebilirlik ve tasarım bağımsızlığı nedeniyle özel tasarım iskele imalatı için tercih edilen bir üretim tekniktir [8].

İdeal bir doku iskelesine ait tüm faktörler belli olsa da biyomalzeme seçimi ve üç boyutlu şekillerin özgülüğü ile ilgili zorluklar devam etmektedir [26]. Yaygın olarak kullanılan biyomalzemeler; polimerler (sentetik ve doğal), seramikler ve metallerdir [9, 11, 21]. Her biyomalzemenin spesifik malzeme ve mekanik özellikleri, işleme-üretim yöntemleri, kimyasal özellikleri, hücre-malzeme etkileşimleri ve çeşitli

etik onay mekanizmaları vardır [26]. 3B doku iskelelerin imalatında birçok çeşit teknik kullanılmıştır. Bu teknikler; mürekkep püskürtmeli 3B yazıcı, biyoyazıcı, erimiş birikimi modelleme (FDM), seçici lazer sinterleme (SLS), stereolitografi (SLA), elektrospinning, dolaylı 3B baskı, lamine nesne imalatı (LOM) ve ekstrüzyon bazlı 3B baskıdır [9, 24, 27].

Genel olarak, geleneksel teknikler kullanılarak hassas kontrol ile karmaşık iskele mikro mimarileri oluşturmak zordur. Bununla birlikte, bilgisayar destekli tasarımın 3B baskı teknolojisi ile baskının kemik dokusu mühendisliğine entegrasyonu, doku iskelelerinin verimliliğini ve yapılarındaki gözenekli doku oluşumlarını büyük ölçüde arttırmıştır [9]. Öte yandan, anatomik olarak doğru cerrahi modellerin üretimi, hastaya özgü geometrilere göre tasarlanan doku iskelelerinin geliştirilmesine zemin hazırlamıştır. Üç boyutlu üretimi içeren teknolojiler, iç gözenek mimarileri içeren karmaşık geometrilere sahip gözenekli yapı iskelelerinin üretimine izin veren gözenekli malzemelerin imal edilmesini ön plana çıkartmıştır [28].

Seramik malzeme kullanarak üç boyutlu baskı yapmayı sağlayan ekstrüzyon bazlı 3B baskı teknolojisi bu tip olanakları sağlayan üretim yapılarından biridir. Seramik hammaddeden hazırlanan ve üç boyutlu ve gözenekli bir mimari tasarımını sağlayan bu yapı kimyasallar ve organik bağlayıcılar aracılığıyla çalışır [28]. Katmanlar halinde montaj tekniği olarak doğrudan mürekkep yazma, yapıları polimerik, sol-jel ve seramik mürekkepleri içeren malzemelerle imal etmek için kullanılmıştır. Teknik, yapısı bir bilgisayar tasarımını izleyen iskeleleri inşa etmek için kullanılabilir. Bu şekilde iskele mimarisi ile istenen mekanik yanıtı elde etmek, kemik rejenerasyon sürecini hızlandırmak ve anatomik kortikal-trabeküler yapı ile kemik oluşumunu yönlendirmek için kontrol edilebilir ve optimize edilebilir [29].

Hiyerarşik görüntü tabanlı veya CAD teknikleri kullanılarak oluşturulan karmaşık iskele mimari tasarımları geleneksel teknikler kullanılarak kolayca oluşturulamaz [30]. Bunun yerine, iskele mimarileri, toplu olarak iskele imalat yöntemleri olarak bilinen katman katman üretim süreçleri kullanılarak inşa edilmelidir. Genel katman üretim süreçleri; 3B bilgisayar modeli oluşturmak 3B bilgisayar modelini yazılımla 2B görüntülerin bir yapı dosyasına dilimlemek, bilgisayar kontrollü bir katman prosesi ile inşa etmek ve nano mimaride yüzey modifikasyonu gibi herhangi bir son işlemle bitirmeyi içermektedir [26].

3B yazıcı işlemi organ yapısının CAD ortamına geçirilmesi ile başlamaktadır. Genellikle bu işlem görüntüleme cihazlarından elde edilen 2B görüntü dilimlerinin bir 3B yapı oluşturması için birbirinin üzerine derlenmesi ve istiflenmesidir. Bilgisayarlı tomografi ve manyetik rezonans görüntüleme bu işlemler için yardımcı elemanlardır. Bu görüntüleme teknolojileri, kesitli organ dilimlerini almaya ve bunları 3B görüntülere derlemeye yardımcı olarak, iskelelerin tasarımının doğal organın yakın bir temsili olmasını sağlar [27].

3B yazıcı işlemi ise şu şekilde çalışmaktadır [31]. Tanımlanmış bir biyoseramik granül tabakası inşa platformunda biriktirilir. Bir mikro dağıtım valfi bağlayıcıyı toz yüzeyine atar ve granülleri seçilen bölgelerde bağlar. Basılan her tabakadan sonra platform tabaka kalınlığına göre alçaltılır ve eski tabaka üzerine yeni seramik tozu bırakılır. Tüm işlemi bitirdikten sonra, parçanın iç yapısında kalan bağlı olmayan tozu gidermek için hafif hava akışı kullanılır [9, 24].

#### **4. 3 BOYUTLU YAZICI TEKNOLOJİSİNİN TASARIMA ETKİSİ (EFFECT OF 3D PRINTER TECHNOLOGY ON DESIGN)**

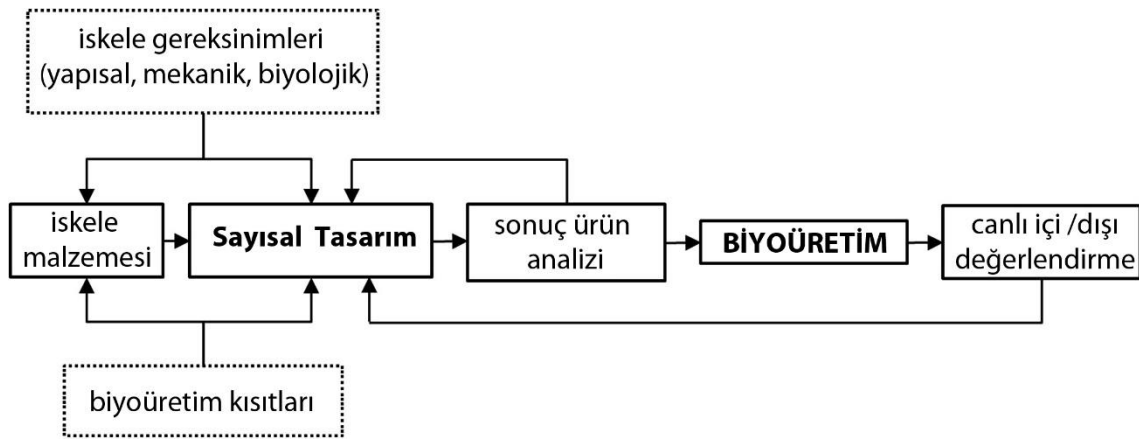
3B yazıcı teknolojilerinin teknolojik devrimlerden biri olacağı konusunda artan bir fikir birliği bulunmaktadır. Özellikle tasarım süreçlerinin hızlı bir şekilde üretime dönüşebilmesi ve test edilebilmesi hem üretimdeki kişiselleştirmeyi hem de probleme uygun üretimin kurgulanmasını sağlamaktadır. Bu durum tasarım alanları ile sağlık alanlarının birlikte çalışma olanaklarını da yaratmaktadır [32]. Bu özellikler, 3B yazıcıların sağlık alanında da etkin bir şekilde kullanılmasına olanak vermektedir. 3B baskı teknolojisi, tıp alanında 2000'li yılların başından itibaren ilk kez dış implantlarının ve özel protezlerin yapımında kullanılmıştır. O zamandan günümüze kadar tıbbi uygulamalarda 3B yazıcı teknolojisi oldukça gelişmiştir. Son zamanlarda yapılan araştırmalarda, kemikler, kulaklar, dış iskeletler, çene kemiği, gözlükler, hücre kültürleri, kök hücreler, kan damarları, vasküler ağlar, dokular ve organların yanı sıra yeni dozaj formları ve ilaç üretmek için 3B yazıcı teknolojileri kullanılmıştır. 3B yazıcının mevcut tıbbi

kullanımları; doku ve organ imalatı, protez, implant ve anatomik modeller yaratmak; ilaç keşfi, doğum ve dozaj formları ile ilgili farmasötik araştırmalar gibi alanlar ile sınıflandırılmaktadır [9, 33].

3B yazıcı teknolojisi, hastaya özel ihtiyaçlara göre isteğe bağlı olarak düşük hacimli veya tekil ürün üretim kabiliyeti nedeniyle biyomedikal cihaz tasarımında ve doku mühendisliğinde de önemli avantajlar oluşturmaktadır [34]. Bu teknolojiler içinde tıbbi görüntüleme araçları, bilgisayar destekli tasarım ve biyomimetik yaklaşımlar gibi araçlar kullanılarak kemik doku iskeleleri için yeni geometrilere yardımcı olabilecek bilgisayar kaynakları, bilgisayar destekli üretim çeşitliliği ve hızlı prototipleme teknolojileri ortaya koyarlar. Bu durum da malzeme bilimince ve yeni mikro üretim teknolojilerine çeşitli avantajlar sunmaktadır [15].

Birçok önemli aşamanın gerçekleştirilmesine rağmen, organ üretiminde veya 3B baskı ile tüm organın inşasında önemli zorluklarla karşılaşmaktadır. Plastik cerrahiden kanser tedavisine ve doğum kusurlarının tedavisinden ampute'ler için protezlere kadar tıpın tüm alanları, 3B baskı ile yaşam kalitesini artırmak veya hastaların daha uzun yaşamasına yardımcı olmak için atılımlar aramaktadır [34]. Malzeme biliminde, yüksek mekanik mukavemete sahip gözenekli yapılar geliştirme yeteneği, farklı ihtiyaçlarla ortaya çıkan uygulamalar için önemlidir. Bu doğal malzemelerin olağanüstü mekanik özellikleri, güç/yoğunluk ve sertlik/yoğunluk oranını optimize etmede oldukça verimli olan anizotropik yapılarına atfedilir. Doğal malzemelerde, olağanüstü mekanik ve zarif mikroyapının benzersiz kombinasyonu bulunmaktadır [29].

Seramik ve biyoaktif cam malzemelerden oluşan doku iskelelerinin tasarımında malzeme özellikleri de ön plana çıkmaktadır. Seramiklerin yalnız kullandıklarında sert ve kırılabilir olmaları, mekanik özelliklerinden dolayı uygunsuz bozulma göstermeleri, biyoaktif cam malzemelerin doğal kırılabilir olmaları, emilim oranının ayarlanmasının zor olması, zorlu tedavi durumlarında yapıların 3 boyutlu manipülasyon zorlukları, toksin metal iyonları salınım potansiyelleri bu malzemelerle gerçekleştirilecek 3B baskıların tasarımını etkilemektedir [9]. İskele tasarımı, mikro-mimarilerin doku gereksinimleri ve üretim süreci kısıtlamaları temelinde siliko içinde yaratıldığı ve rafine edildiği için giderek tekrarlanan bir süreç haline gelmektedir. Bu tasarım paradigmasına genel bir bakış Şekil 1'de yer almaktadır [35].



Şekil 1. İskele tasarımındaki önemli adımların akış şeması [35].

İskele tasarımındaki yaklaşımlar, istenen mekanik fonksiyon ve kütle taşıma (yani geçirgenlik ve difüzyon) özelliklerine ulaşmak ve bu yapıları keyfi ve karmaşık 3B anatomik şekiller içinde üretmek için hiyerarşik gözenekli yapılar oluşturabilmelidir. Hiyerarşik, nanometreden milimetre seviyesine kadar ölçeklerdeki özelliklerin, iskelenin birbiriyle çelişen mekanik işlev ve toplu taşıma ihtiyaçlarını ne kadar iyi karşıladığını belirleyeceği anlamına gelir [30]. Malzeme kimyası, işlemeyle birlikte, bir iskelenin elde edebileceği maksimum fonksiyonel özellikleri ve hücrelerin iskeleyle nasıl etkileştiğini belirler. Bununla birlikte, hücre beslenmesi için kütle taşıma gereksinimleri, hücre göçü için gözenekli kanallar ve hücre eki için yüzey özellikleri gözenekli bir iskele yapısını gerektirir. Bu çerçevede 3B teknolojisi hem malzeme hem de üretim yöntemi açısından hücre yapısı için uygun tasarım ortamları oluşturmaktadır. Üretilen doku iskeleler, iyi karakterize edilmiş mekanik ve taşıma özelliklerine sahip farklı element birimleri kullanılarak tasarlanmaktadır. İskele rekonstrüksiyonu için spesifik kriterlerin kullanılması, her bir tasarım

parametresinin genel iskele üzerindeki etkisinin daha iyi anlaşılmasını sağlamaktadır [35]. Seçilen imalat süreci ışığında da farklı tasarım yöntemleri önerilmiştir (Tablo 1) [24, 28, 31].

**Tablo 1.** Doku mühendisliğinde iskeleleri basmak için kullanılan çeşitli 3B yazıcı tekniklerinin karşılaştırma tablosu [24, 28, 31, 39, 40].

<b>3B Yazıcı Yöntemi</b>	<b>Avantajları</b>	<b>Dezavantajları</b>
<i>Kartuşlu 3B Yazıcı (3DP)</i>	<i>Kullanılabilir malzemeler açısından çok yönlüdür</i> <i>Çıkıntı veya karmaşık yapılar için destek gerekli değildir</i>	<i>Toksin oluşturma potansiyeli yüksek (bağlayıcıların tamamen temizlenememesi)</i> <i>Lazer sinterlemeye kıyasla düşük mekanik mukavemetli sonuçlar</i> <i>Zaman alıcı (işlem sonrası)</i>
<i>Biyoyazıcı</i>	<i>Canlı hücreleri yazabilir</i> <i>Yumuşak doku uygulaması</i>	<i>Yazıcı ucu boyutu kısıtlıdır (işleme sırasında sitotoksin olmamalıdır)</i> <i>Karmaşık şekiller yazdırmak için destek yapısı gerektirir</i>
<i>Erimiş Birikimi Modelleme (FDM)</i>	<i>Az sitotoksin üretir.</i> <i>Nispeten ucuz (yazıcı ve materyaller)</i>	<i>Malzemelerde sınırlama (genellikle termoplastik gerektirir)</i> <i>Kullanılan malzemeler biyolojik olarak parçalanamaz</i> <i>Çıkıntılar ve karmaşık şekiller için destek yapısı gerektirir</i> <i>Son işlem gerekebilir</i> <i>Düşük Çözünürlük</i>
<i>Seçici Lazer Sinterleme (SLS)</i>	<i>Yüksek mekanik mukavemete sahip iskele sağlar</i> <i>Toz yatağı karmaşık yapılara destek sağlar</i> <i>İyi çözünürlük</i>	<i>Sınırlı malzeme (büzülme ve ısıya dayanıklı olmalıdır)</i> <i>Çok yüksek sıcaklık gerekir (1400°C'ye kadar)</i> <i>Pahalı ve zaman alıcı (işleme ve işleme sonrası)</i>
<i>Stereolitografi (SLA)</i>	<i>Çok yüksek çözünürlük</i> <i>Üretim hızı</i> <i>Pürüzsüz yüzey kalitesi</i>	<i>Malzemeler fotopolimerler olmalıdır</i> <i>Pahalı (iki foton yazıcı)</i> <i>Çıkıntı ve karmaşık nesnelere için destek sistemi gereklidir</i>
<i>Elektrospinning</i>	<i>İmalat hızı</i> <i>Hücre baskısı</i> <i>Yumuşak doku mühendisliği</i> <i>Düşük kesme gerilimi (biyoelektrospreying)</i>	<i>Elyafların rastgele yönlendirilmesi</i> <i>Düzensiz olmayan gözenek boyutları</i> <i>Yüksek voltaj (1-30 kV) gereksinimleri</i>
<i>Dolaylı 3B baskı</i>	<i>Prototipleme / üretim öncesi için iyi</i> <i>Kalıp alındıktan sonra malzeme çok yönlülüğü döküm</i>	<i>Biyo uyumluluk için tescilli mumlar gerektirir (Balmumu Baskı)</i> <i>Düşük doğruluk / çözünürlük</i> <i>Döküm için gerekli kalıp</i> <i>Uzun üretim süreleri (kalıp → döküm → işleme → ürün)</i>
<i>Robotik destekli biriktirme / robocasting</i>	<i>Seramikler için verimli üretim</i>	<i>Farklı malzemeler kullanılmamakta</i>

3B yazıcı teknolojileri arasında toz bazlı üç boyutlu baskı, kemik doku iskelesi üretimi için sıklıkla kullanılmaktadır. Toz bazlı üç boyutlu baskının en önemli avantajı, polimerlerden seramiklere hem saf hem de katkılı geniş bir yelpazede kemik doku iskelesi oluşturabilmesidir [31]. Günümüzde toz bazlı 3B baskı ile hastanın kendi anatomik bilgilerinden elde edilen verileri kullanarak seramik esaslı özel tasarım kemik implantları geliştirilmeye başlanmıştır. 3B baskı, karmaşık iç yapılara ve yüksek çözünürlüğe sahip hidroksiapat bazlı kemik doku iskeleleri üretimine olanak tanımaktadır [9, 26, 31, 36]. 3B yazıcı teknolojisi sonrasında oluşturulan ideal kemik iskelesi, implante edilecek dokuya benzer mekanik özelliklere sahip biyolojik olarak uyumlu ve parçalanabilir bir materyalden oluşmalıdır. İskelelerin tasarımında kemik dokularının yerine kalıcı olarak yer almayacakları dikkate alınmalıdır. İdeal olarak konakçı hücreleri, hücre dışı matrisi biriktirmek için kolaylaştırıcı bir iskelete sahip olmalı ve zaman içinde iskele yapısını değişmesine olanak sağlamalıdır. Kemik doku iskelesinin 3B mimarisi, hücrenin ve besin maddesinin taşınmasına izin vermek için birbirine bağlı bir yapıya sahip oldukça gözenekli olmalı ve yüzeyi aynı zamanda hücre bağlanmasını, çoğalmasını ve farklılaşmasını kolaylaştırmak için optimize edilmelidir. Cerrahi bir bakış açısı oluşturmak için, kemik doku iskele malzemesinin ayrı kemik kusurlarının yerinde tedavisine imkân vermek için farklı şekil ve boyutlarda kolaylıkla manipüle edilebilmelidir [9, 37-39].

**Tablo 2.** *Biyolojik olarak bir iskele tasarımı için gereksinimlerin şematik gösterimi [35].*

<b>Tasarım Parametreleri</b>	<b>Biyolojik Gerekçe</b>
<i>Biyomalzeme bileşimi</i>	<i>Hücre canlılığının ve çoğalmasının desteklenmesi</i> <i>İmplantasyon için uygun</i>
<i>Gözeneklilik</i>	<i>Hücre alımının, toplanmasının ve farklılaşmasının desteklenmesi</i> <i>Vaskülarizasyonun desteklenmesi</i>
<i>Mimari (gözenek boyutu, şekli ve ara bağlantı)</i>	<i>3B doku büyümesinin desteklenmesi</i> <i>Yeni dokunun morfolojisini kontrol edilmesi</i> <i>Hücre çoğalmasının desteklenmesi</i> <i>Belirli soylara hücre farklılaşmasının desteklenmesi</i>
<i>Mekanik özellikler</i>	<i>Mekanik yüklemenin desteklenmesi</i>
<i>Toplu taşıma özellikleri</i>	<i>Gaz ve besin difüzyonunun desteklenmesi</i>
<i>Bozulma oranı</i>	<i>Yeni doku büyümesine izin verilmesi</i> <i>ECM yeniden düzenlemesine izin verilmesi</i> <i>Doku iyileşme oranı</i>

Doku iskeleleri tasarımında birçok sayıda üretim tekniği kullanılmıştır. Bununla birlikte, bu iskelelerin çoğu, geometrik kısıtlamaları ve / veya nihai dokulu malzemenin malzeme özellikleri ile ilgili önemli dezavantajlara sahiptir. Bu çerçevede tasarım parametrelerine biyolojik gerekçeler de eklenmektedir (Tablo 2) [24, 27, 34, 39]. Giannitelli ve ark. (2014)'nin belirlemiş olduğu parametreler doku iskelesi tasarımında biyolojik parametreler için bize belirli bir kısıt tablosu sunmaktadır. Biyoaktif seramiklerin kimyasal yapıları ve bu malzeme kategorisinin izin verdiği sonuç ürün ve üretim teknolojisi düşünüldüğünde bu kısıtlar ve Tablo 1'deki üretim teknolojileri değerlendirmeleri sonucunda farklı doku iskeleleri tasarımında deneysel yöntemler kurgulanabilir [35].



## 5. SONUÇ (CONCLUSION)

Kemik dokusu deformasyonu ve kaybı ile yaşamın kalitesini ve yaşam standartlarını olumsuz etkileyen osteoporozun önüne geçmek için kemik rejenerasyonunun sağlanması gerekmektedir. Kemik doğal bir kompozit yapı olup, doku iskelesi olarak kullanılacak malzemelerin de biyolojik olarak uyumlu, mekaniksel olarak kemik dokusuna benzer özelliklere sahip olmalıdır. Doğal ve sentetik polimer ve biyoseramiklerin bulunduğu kompozit biyomalzemelerin üretimi ile yeni kemik oluşumu sağlanmıştır. Kemik iskelesi üretiminde baskı prensipleri ve malzeme türlerine göre farklı yöntemler uygulanmış ancak üç boyutlu baskı gibi teknolojilerin gelişimi ile kemik mikro mimarisini kontrol imkânı doğmuştur. 3B yazıcılar, kemik iskelesi tasarımında, tasarım süreci ve test aşamaları için yeni imkanlar sunmaktadır. Osteoporozun etkilerinin kaldırılabilmesi için hasarlı kemiğin yapısını tam olarak taklit edebilmek ve kemik yapısının tekrarlanabilirliğinin kontrol edilebilmesi gerekmektedir. Biyoseramiklerin 3B yazıcı alanının karşılaştığı zorlukların çoğu, 3B tasarım ve basım süreçlerindeki spesifik teknik, malzeme ve hücresel yönler ile ilgilidir. Halihazırda, malzeme çeşitliliği, malzemelerin toz bazlı veya baskı kafasından ekstrüde edilecek kadar düşük viskoziteye sahip olması ile sınırlıdır. Fakat 3B yazıcı malzemelerinin geliştirilmesi hem üretim teknolojilerine hem de iskelet doku tasarımlarında yeni fırsatlar oluşturacaktır.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] N. S. Binulal, M. Deepthy, N. Selvamurugan, K. T. Shalumon, S. Suja, U. Mony, ... & S. V. Nair, Role of nanofibrous poly (caprolactone) scaffolds in human mesenchymal stem cell attachment and spreading for in vitro bone tissue engineering—response to osteogenic regulators, *Tissue Engineering Part A* 16(2) (2010) 393-404.
- [2] S. D. McCullen, Y. Zhu, S. H. Bernacki, R. J. Narayan, B. Pourdeyhimi, R. E. Gorga & E. G. Lobo, Electrospun composite poly (L-lactic acid)/tricalcium phosphate scaffolds induce proliferation and osteogenic differentiation of human adipose-derived stem cells, *Biomedical materials*, 4(3) (2009) 035002.
- [3] M. Ngiam, S. Liao, A. J. Patil, Z. Cheng, C. K. Chan & S. Ramakrishna, The fabrication of nano-hydroxyapatite on PLGA and PLGA/collagen nanofibrous composite scaffolds and their effects in osteoblastic behavior for bone tissue engineering, *Bone*, 45(1) (2009) 4-16.
- [4] B. Thavornyutikarn, P. Tesavibul, K. Sitthiseripratip, N. Chatarapanich, B. Feltis, P. F. Wright & T. W. Turney, Porous 45S5 Bioglass®-based scaffolds using stereolithography: Effect of partial pre-sintering on structural and mechanical properties of scaffolds, *Materials Science and Engineering: C* 75 (2017) 1281-1288.
- [5] H. Zhou & J. Lee, Nanoscale hydroxyapatite particles for bone tissue engineering, *Acta biomaterialia*, 7(7) (2011) 2769-2781.
- [6] L. C. Hwa, S. Rajoo, A. M. Noor, N. Ahmad & M. B. Uday, Recent advances in 3D printing of porous ceramics: A review. *Current Opinion, Solid State and Materials Science*, 21(6) (2017) 323-347.
- [7] F. Wang & M. S. Li, A biomimetic method of hydroxyapatite powders synthesized in simulated body fluid, *Key Engineering Materials* 297 (2005) 1371-1375.
- [8] B. A. Dikici, S. Dikici, O. Karaman & H. Oflaz, The effect of zinc oxide doping on mechanical and biological properties of 3D printed calcium sulfate based scaffolds, *Biocybernetics and Biomedical Engineering* 37(4) (2017) 733-741.
- [9] G. Turnbull, J. Clarke, F. Picard, P. Riches, L. Jia, F. Han, ... & W. Shu, 3D bioactive composite scaffolds for bone tissue engineering, *Bioactive materials*, 3(3) (2018) 278-314.
- [10] D. G. Disler, T. R. McCauley, C. G. Kelman, M. D. Fuchs, L. M. Ratner, C. R. Wirth, & P. P. Hospodar, Fat-suppressed three-dimensional spoiled gradient-echo MR imaging of hyaline cartilage defects in the knee: comparison with standard MR imaging and arthroscopy, *AJR American journal of roentgenology* 167(1) (1996) 127-132.

- [11] L. L. Hench & J. Wilson (Eds.), Clinical performance of skeletal prostheses (pp. 33-40). London: Chapman & Hall, 1996.
- [12] P. Duchenne & G. W. Hastings, Metal and ceramic biomaterials. Vol. II 1984.
- [13] J. B. Park & J. D. Bronzino (Eds.), Biomaterials: principles and applications. crc press, 2002.
- [14] L. L. Hench & J. Wilson, Chapter 1. Introduction. An introduction to bioceramics. London (Inglaterra): World Scientific Publishing 1-25, 1993.
- [15] E. Leonardi, G. Ciapetti, N. Baldini, G. Novajra, E. Verné, F. Bairo & C. Vitale-Brovarone, Response of human bone marrow stromal cells to a resorbable P2O5–SiO2–CaO–MgO–Na2O–K2O phosphate glass ceramic for tissue engineering applications. *Acta biomaterialia*, 6(2) (2010) 598-606.
- [16] S. Lopez-Esteban, E. Saiz, S. Fujino, T. Oku, K. Suganuma & A. P. Tomsia, Bioactive glass coatings for orthopedic metallic implants. *Journal of the European Ceramic Society*, 23(15) (2003) 2921-2930.
- [17] R. Ravarian, F. Moztarzadeh, M. S. Hashjin, S. M. Rabiee, P. Khoshakhlagh & M. Tahriri, Synthesis, characterization and bioactivity investigation of bioglass/hydroxyapatite composite, *Ceramics International* 36(1) (2010) 291-297.
- [18] B. M. Chen-Charpentier & H. V. Kojouharov, An unconditionally positivity preserving scheme for advection-diffusion reaction equations. *Mathematical and computer modelling*, 57: 9 (2013) 2177-2185.
- [19] H. Oudadesse, E. Dietrich, Y. L. Gal, P. Pellen, B. Bureau, A. A. Mostafa & G. Cathelineau, Apatite forming ability and cytocompatibility of pure and Zn-doped bioactive glasses. *Biomedical Materials*, 6(3) (2011).
- [20] M. Sabbatini, F. Boccafoschi, M. Bosetti & M. Cannas, Adhesion and differentiation of neuronal cells on Zn-doped bioactive glasses, *Journal of biomaterials applications*, 28(5) (2014) 708-718.
- [21] S. Nath, S. Kalmodia & B. Basu, Densification, phase stability and in vitro biocompatibility property of hydroxyapatite-10 wt% silver composites, *Journal of Materials Science: Materials in Medicine* 21(4) (2010) 1273-1287.
- [22] P. Batra, & R. Kapoor, A novel method for heart rate measurement using bioimpedance, *International Conference on Advances in Recent Technologies in Communication and Computing* (2010) 443-445.
- [23] G. Göller, F. N. Oktar, D. Toykan & E. S. Kayali, The improvement of titanium reinforced hydroxyapatite for biomedical applications. In *Key Engineering Materials* vol. 240 (2003) 619-622.
- [24] B. C. Gross, J. L. Erkal, S. Y. Lockwood, C. Chen & D. M. Spence, Evaluation of 3D printing and its potential impact on biotechnology and the chemical Sciences, *Analytical chemistry* 86(7) (2014) 3240.
- [25] C. L. Ventola, Medical applications for 3D printing: current and projected uses, *Pharmacy and Therapeutics*, 39(10) (2014) 704.
- [26] H. N. Chia & B. M. Wu, Recent advances in 3D printing of biomaterials, *Journal of biological engineering* 9(1) 4 (2015).
- [27] A. V. Do, B. Khorsand, S. M. Geary & A. K. Salem, 3D printing of scaffolds for tissue regeneration applications, *Advanced healthcare materials* 4(12) (2015) 1742-1762.
- [28] H. Shao, Y. He, J. Fu, D. He, X. Yang, J. Xie, ... & Z. Gou, 3D printing magnesium-doped wollastonite/ $\beta$ -TCP bioceramics scaffolds with high strength and adjustable degradation, *Journal of the European Ceramic Society*, 36(6) (2016) 1495-1503.
- [29] Q. Fu, E. Saiz & A. P. Tomsia, Bioinspired strong and highly porous glass scaffolds, *Advanced functional materials*, 21(6) (2011) 1058-1063.

- [30] S. J. Hollister, Porous scaffold design for tissue engineering, *Nature materials*, 4(7) (2005) 518-524.
- [31] B. Leukers, H. Gülkan, S. H. Irsen, S. Milz, C. Tille, M. Schieker & H. Seitz, Hydroxyapatite scaffolds for bone tissue engineering made by 3D printing. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine* 16(12) (2005) 1121-1124.
- [32] J. Messelbeck & L. Sutherland, Applying environmental product design to biomedical products research, *Environmental health perspectives*, 108(suppl 6) (2000) 997-1002.
- [33] Rayna, T., Striukova, L., & Darlington, J. Co-creation and user innovation: The role of online 3D printing platforms. *Journal of Engineering and Technology Management*, 37 (2015) 90-102.
- [34] A. Bandyopadhyay, S. Bose & S. Das, 3D printing of biomaterials. *MRS bulletin*, 40(2) (2015) 108-115.
- [35] S. M. Giannitelli, D. Accoto, M. Trombetta & A. Rainer, Current trends in the design of scaffolds for computer-aided tissue engineering, *Acta biomaterialia*, 10(2) (2014) 580-594.
- [36] A. Butscher, M. Bohner, S. Hofmann, L. Gauckler & R. Müller, Structural and material approaches to bone tissue engineering in powder-based three-dimensional printing, *Acta biomaterialia*, 7(3) (2011) 907-920.
- [37] C. H. Chang, C. Y. Lin, F. H. Liu, M. H. C. Chen, C. P. Lin, H. N. Ho & Y. S. Liao, 3D printing bioceramic porous scaffolds with good mechanical property and cell affinity, *PloS one*, 10(11) (2015).
- [38] S. H. Irsen, B. Leukers, C. Höckling, C. Tille & H. Seitz, Bioceramic granulates for use in 3D printing: process engineering aspects. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik: Entwicklung, Fertigung, Prüfung, Eigenschaften und Anwendungen technischer Werkstoffe*, 37(6) (2006) 533-537.
- [39] S. V. Murphy & A. Atala, 3D bioprinting of tissues and organs. *Nature biotechnology* 32(8) (2014) 773.
- [40] A. Özyuğuran-Arifoğlu, Stronsiyum Katkılı Biyocam ve Bakır Nanoparçacıklarından 3D Kompozit Yapı İskelesi Üretimi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji* , 6 (3) (2018) 558-569 . DOI: 10.29109/gujsc.



## Detecting Different Types of Distributed Denial of Service Attacks

Esra SÖĞÜT<sup>1,\*</sup>, Saadin OYUCU<sup>2</sup>, O. Ayhan ERDEM<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, 06500, Yenimahalle, ANKARA

<sup>2</sup>Adıyaman Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, 02040, Merkez, ADIYAMAN

### Abstract

Distributed Denial of Service Attacks (DDoS) threaten every device connected to the Internet. The fast progress and wide spreading DDoS attacks are among the most well-known features of them. Many studies have been conducted to reduce the impact of these fast-progressing and widespread attacks. However, due to the continuous development of attack types and the implementation of different techniques, the prevention of attacks has not been fully achieved. Therefore, within the scope of this study, a DDoS attack was examined first and applications used to detect it were investigated. A system has been proposed to detect DDoS attacks using data mining methods. For the proposed system, experiment mechanisms for Transmission Control Protocol (TCP) Flooding, Spoofing Internet Protocol (IP), SYN Flood with Spoofed IP, and User Datagram Protocol (UDP) Flooding, which are among the DDoS attack types, were established and the attacks were performed to obtain network flow data. The classification was made with appropriate data mining methods according to the specified features and ZeroR, OneR, Naive Bayes, Bayes Net, Decision Stump, and J48 algorithms were used. According to these algorithms, the best classification rate has been reached with J48 algorithm. The results have shown that the proposed system plays an important role in determining the DDoS attack type. The proposed system will ensure that appropriate detection mechanisms are applied more quickly, effectively and efficiently in real attacks.

### Article Info

Research article  
 Received: 13/12/2020  
 Revision: 20/01/2021  
 Accepted: 22/01/2021

### Makale Bilgisi

Araştırma makalesi  
 Başvuru: 13/12/2020  
 Düzeltilme: 20/01/2021  
 Kabul: 22/01/2021

### Keywords

DDoS  
 SYN Flooding  
 Spoofing IP  
 Cyber Security  
 Data Mining

### Anahtar Kelimeler

DDos  
 SYN Saldırısı  
 IP Sahteciliği Saldırısı  
 Siber Güvenlik  
 Veri Madenciliği

### Farklı Türde Dağıtık Hizmet Dışı Bırakma Saldırılarının Tespiti

#### Öz

Dağıtık Hizmet Dışı Bırakma Saldırıları (DDoS: Distributed Denial of Service Attacks) internete bağlı her bir cihazı tehdit etmektedir. DDoS saldırılarının hızlı ilerlemesi ve geniş alana yayılması en bilinen özelliklerindedir. Hızlı ilerleyen ve geniş alana yayılan bu saldırıların etkisini azaltmak için birçok çalışma yapılmıştır. Ancak saldırı türlerinin sürekli gelişmesi ve farklı tekniklerin uygulanması nedeni ile saldırıların engellenmesi tam olarak gerçekleştirilememiştir. Bu nedenle çalışma kapsamında öncelikle DDoS saldırısı incelenmiş ve tespit etmeye yönelik uygulamalar araştırılmıştır. Veri madenciliği yöntemleri kullanılarak DDoS saldırılarını tespit etmek için bir sistem önerilmiştir. Önerilen sistem için DDoS saldırı türlerinden Aktarım Denetimi Protokolü Saldırısı (TCP: Transmission Control Protocol Flooding), IP Sahteciliği Saldırısı (Spoofing IP: Internet Protocol), Maskelenen IP ile SYN Saldırısı (SYN Flood with Spoofed IP) ve Kullanıcı Veri Bloğu İletişim Kuralları Saldırısı (UDP: User Datagram Protocol Flooding) için deney düzenekleri kurulmuş ve saldırılar gerçekleştirilerek ağ akış verileri elde edilmiştir. Belirlenen özneliklere göre uygun veri madenciliği yöntemleri ile sınıflandırma yapılmış ve ZeroR, OneR, Naive Bayes, Bayes Net, Decision Stump ve J48 algoritmaları kullanılmıştır. Bu algoritmalara göre en iyi sınıflandırma oranına J48 algoritması ile ulaşılmıştır. Elde edilen sonuçlar, önerilen sistemin DDoS saldırı türü belirlenmesinde önemli rol oynadığını göstermiştir. Önerilen sistem, gerçek saldırılarda uygun tespit mekanizmalarının daha hızlı, etkin ve verimli şekilde uygulanmasını sağlayacaktır.

## 1. INTRODUCTION

Every day there are new and rapid developments in the field of cyber security. This innovation in the cyber world makes it increasingly difficult to maintain security in the same world. Attack types in the cyber world are also affected by these developments and become more diversified. It is becoming increasingly difficult to detect evolving and diverse types of attacks with the traditional methods. Instead of single types of attacks, advanced types of attacks with very different characteristics are realized. Defense methods applied to different types of attacks should also be different and applicable. Therefore, detection and prevention systems with different or new features from traditional methods should be developed against cyber attacks.

DDoS (Distributed Denial of Service Attacks) come first in cyber attacks [1]. The main purpose of DDoS attacks is to disable accessibility, which is one of the information security features. DDoS attacks aim to make the resources of a target or target systems unavailable. These resources (processor, memory, disk space, etc.) are usually resources that will prevent the system from serving. Damaging these resources or preventing them from working will cause major disruptions in the continuity of the service provided. Each DDoS attack can occur in different types [2,3]. Generally, while the packets sent to the target system are being processed, system resources and bandwidth are consumed excessively and a DDoS attack occurs. As a result of these attacks, the target system becomes unresponsive to incoming requests and packets and becomes out of service [4,5].

DDoS attack types have different features and characteristics from each other. Attacks such as Transmission Control Protocol (TCP) Flooding, Spoofing IP (Internet Protocol), SYN Flood with Spoofed IP, User Datagram Protocol (UDP) Flooding, Internet Control Message Protocol (ICMP) Flooding, Hyper-Text Transfer Protocol (HTTP), Get/Post, and Ping of Death are types of DDoS attacks [6-11]. In this study, four different types of DDoS attacks encountered most in the literature were examined and discussed experimentally. These attack types are TCP Flooding, Spoofing IP, SYN Flood with Spoofed IP, and UDP Flooding.

The main purpose of the TCP Flooding is to fill the memory by sending a large number of packets to the content from the open ports of the target system and to put the system out of service [12]. Spoofing IP Attack is the unauthorized use of an IP address during an attack. The main purpose of this attack is to hide the identities of attacker systems and to make it difficult to be discovered [13]. In SYN Flood with Spoofed IP, SYN packets are sent to the target system by being masked by an IP address and the system memory is filled. The system sending the packets is in unidentified status and the target system becomes inoperable due to over-sent packets [12]. The main purpose of UDP Flooding is to randomly select the ports of the target system and send a large amount of UDP packets to the system [14]. Each of these mentioned attack types has different characteristics from the other. Therefore, within the scope of the study, sample experiments and different analyzes were made for the mentioned attack types.

When the related studies are examined, it is seen that the detection and prevention studies of traditional attacks are insufficient in detecting DDoS attacks [15]. The unknown source of the attack, large number of the attack sources, attacks having more than one part, the network flow generated at the time of the attack is similar to the normal network flow, and the failure of certain rules used before can be shown as the reasons of this situation [16]. In their study on early detection of DDoS attacks, Yuan and Mills monitored the network-wide effects of the attacks. They used cross-correlation analysis to create traffic patterns. These patterns are used to indicate where and when a DDoS attack may occur [17]. Shiaeles et al. proposed a system using a fuzzy prediction method against real-time DDoS attacks. If the packet arrival time which they observe is lower than the average packet arrival time, then the event is seen as a DDoS attack. Besides, network-based DDoS attacks were investigated in their study [18]. In a different study, Karimzad and Faraahi proposed an anomaly-based detection method based on the characteristics of attack packets. By activating the Radial Basis Function neural network with vectors based on seven attributes, they classified the traffic as normal or a DDoS attack. The data set of the University of California at Los Angeles was used for this process. The proposed method can classify the system as normal or attack, but cannot define and classify the types of attacks [19]. In the study of Al-Duwairi, correlation analysis between the outgoing and incoming traffic of a network was made and the occurring

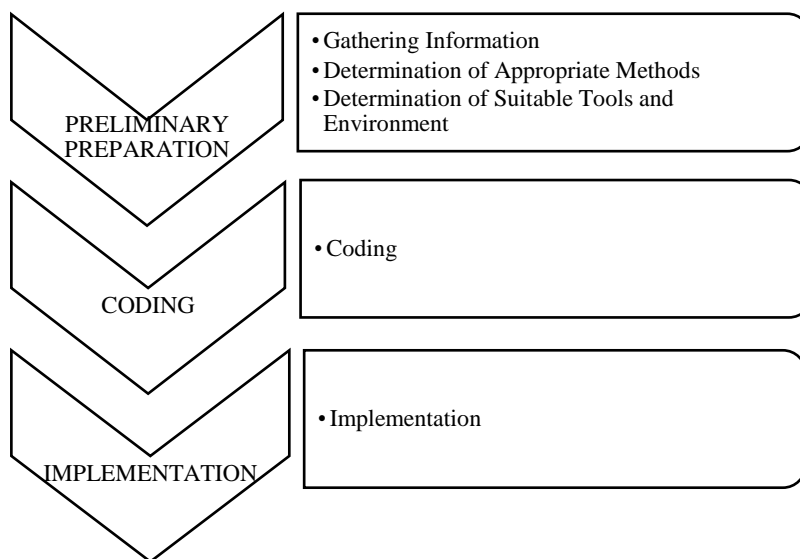
changes were used to detect DDoS attacks. DARPA dataset is used for this and Fuzzy classification methods have been preferred to ensure their accuracy [20].

When the studies in the literature are examined, it has been seen that many studies in which TCP/IP packet header is analyzed according to well-defined rules and conditions have been conducted [17,21], and packet features showing DDoS attack in network traffic [19,20,22] have been performed. However, these studies made a limited progress and the desired level of attack detection could not be achieved. One of the biggest reasons for this situation is that each attack has its characteristics. For this reason, DDoS attacks were primarily examined within the scope of the study. As a result of the investigations, information was provided to understand DDoS attacks and to increase awareness. Besides, a system using data mining methods to detect DDoS attacks has been proposed. For the proposed system, firstly, experimental mechanisms for TCP Flooding, Spoofing IP, SYN Flood with Spoofed IP, and UDP Flooding, which are among DDoS attack types, have been established. Network flow data were obtained through these experimental setups. The Source Port, Source IP, Destination IP, Destination Port, Protocol, Size, Number, Delay Time, and DDoS Type features are specified to be used in data mining. The classification was made with data mining methods suitable for these features and algorithms such as ZeroR, OneR, Naive Bayes, Bayes Net, Decision Stump and J48. The results obtained showed that the proposed system plays an important role in determining the type of attack when there is a DDoS attack.

The study consists of six parts. In the first part, basic information and a review of literature are given. Information about the systems used and the steps for to perform DDoS attacks are given in the second part. In the third part, studies on listening to attacks and obtaining data set are presented in detail. The development of the proposed system with data mining methods is given in the fourth part, and the results of the classification algorithm, which is suitable for the developed system and has the highest success rate, are given in the fifth part. In the last part, a general evaluation of the study has been done and information about the future planned studies is presented.

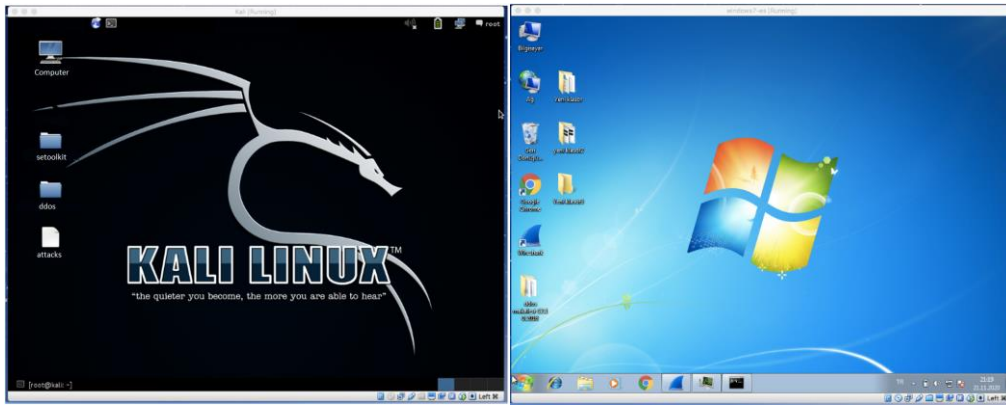
## 2. PERFORMING DDOS ATTACKS

DDoS attack mechanisms were prepared to be used in the experiments performed in this study. With the prepared DDoS attack mechanisms, the target system, which is previously determined, was reached and the attack operations were performed. The target system has been reached, system resources have been used excessively, and the performance level of the system has been minimized. Thus, the system has become inoperable. The steps determined for the attack carried out in this study are given in Figure 1.



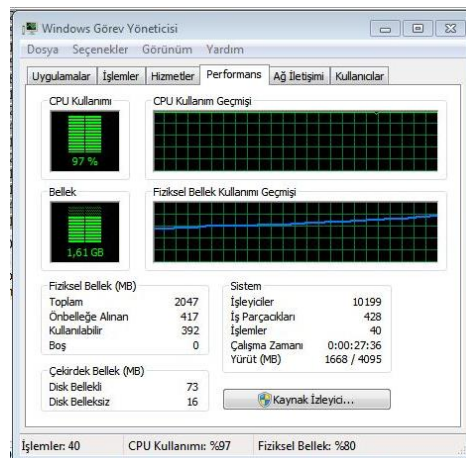
*Figure 1. Steps to perform DDoS attacks*

The steps taken for DDoS attacks are preliminary preparation, coding, and implementation, respectively (Figure 1). Preliminary preparation is an important step in the realization of DDoS attacks. The operations performed for preliminary preparation consist of three steps. The first of these steps is information gathering. At this step, target information (IP information, system information, function information, etc.) is obtained. In determining the appropriate methods, which is the second step of the preliminary phase, the types of attacks to be applied to the target system are determined. After gathering information about the target system and determining the appropriate attack type, the tools and environment suitable for the attack were determined. VirtualBox virtualization environment was chosen for the attack environment and the necessary experimental mechanisms for the attack were built on this environment. An environment with a Windows operating system as the target system and a Kali Linux operating system as an attacker was used. Screenshots of these systems are shown in Figure 2.



**Figure 2.** Views of the attacker and target systems

In the coding step, the necessary coding for the attack has been done. Experiments were prepared in two different ways for each of the four attacks using the hping3 tool in the attacker system. It is intended to damage the functioning of the target system. Attacking the target system was performed during the implementation phase. For this, four different DDoS attack types commonly seen in the literature were selected [6-11]. After the necessary steps were taken, the functioning of the target system was damaged. The visual about this is given in Figure 3.



**Figure 3.** The operating status of the target system at the time of the attack

When the attacks were made, the resource usage and operating performance of the target system were significantly affected (Figure 3). The CPU utilization rate of the target system has reached 97% and the physical memory utilization rate has exceeded 80%. The operating condition of the system is affected and has been minimized.

### 3. DATA OBTAINING

After the performance analysis of the target system could be tracked live when the attack was made, the data collection step was started. Wireshark packet analysis tool was used to listen to the target system network for each attack and to collect the obtained network flow data. Wireshark is a useful tool that enables network traffic to be monitored, analyzed, and filtered on-demand, where necessary, via a graphical interface [23]. An example of monitoring attacks with Wireshark is given in Figure 4.

Source Port	Source IP	Destination IP	Destination Port	Protocol	Size	Number	Delay Time	DDoS Type
31270	192.168.1.35	192.168.1.34	0	TCP	60	41494	2.935291000	
31271	192.168.1.35	192.168.1.34	0	TCP	60	41495	2.935290000	
31272	192.168.1.35	192.168.1.34	0	TCP	60	41496	2.935353000	
31273	192.168.1.35	192.168.1.34	0	TCP	60	41497	2.935353000	
31274	192.168.1.35	192.168.1.34	0	TCP	60	41498	2.935353000	
31275	192.168.1.35	192.168.1.34	0	TCP	60	41499	2.935352000	
31276	192.168.1.35	192.168.1.34	0	TCP	60	41500	2.935353000	
31277	192.168.1.35	192.168.1.34	0	TCP	60	41501	2.935353000	
31278	192.168.1.35	192.168.1.34	0	TCP	60	41502	2.935352000	
31279	192.168.1.35	192.168.1.34	0	TCP	60	41503	2.935353000	
31280	192.168.1.35	192.168.1.34	0	TCP	60	41504	2.935353000	
31281	192.168.1.35	192.168.1.34	0	TCP	60	41505	2.935353000	
31282	192.168.1.35	192.168.1.34	0	TCP	60	41506	2.935227000	
31283	192.168.1.35	192.168.1.34	0	TCP	60	41507	2.935326000	
31284	192.168.1.35	192.168.1.34	0	TCP	60	41508	2.935392000	
31285	192.168.1.35	192.168.1.34	0	TCP	60	41509	2.935392000	
31286	192.168.1.35	192.168.1.34	0	TCP	60	41510	2.935392000	
31287	192.168.1.35	192.168.1.34	0	TCP	60	41511	2.935392000	

**Figure 4.** Tracking attacks with Wireshark

Detecting network traffic completely in a short time is of great importance for attack detection [24]. The data set KDDCUP99 was examined and 9 features found suitable for this study were determined [25-27]. Descriptions and explanations of these features belonging to the data set obtained by Wireshark are given in Table 1.

**Table 1.** Network flow data features

No	Feature	Explanation
1	Source Port	It contains the port information used by the computer sending the packet.
2	Source IP	The IP address of the computer sending the packet.
3	Destination IP	The IP address of the computer receiving the package.
4	Destination Port	It contains the port information of the computer receiving the packet.
5	Protocol	It shows which protocol the packet belongs to.
6	Size	The size of the packet sent/received. The data size type used in this study was determined as Byte.
7	Number	The number of all packets sent/received.
8	Delay Time	It is the time difference between the previous pack and the next pack. This difference is handled in seconds (sec).
9	DDoS Type	It shows the type of DDoS attack implemented.

For the detection of the attack using the attributes specified in Table 1, a network-based system according to its location, anomaly-based according to the identification method, and non-real-time according to the data processing time has been proposed.



#### 4. SYSTEM DEVELOPMENT

Data mining is one of the methods used to transform large amounts of data collected very quickly, into meaningful information as a result of various analyzes [24]. In this study, data mining was used to detect attacks. When using data mining methods, the Weka tool is used for data processing and statistical evaluation of learning methods on data [27]. In the proposed system, the Weka tool was used to perform these operations and to apply data methods such as visual monitoring of the model extracted from the raw data.

When the literature is examined, it is seen that different classification algorithms are prominent in data mining for attack detection and some of them are frequently used [28-30]. ZeroR, OneR, Naive Bayes, Bayes Net, Decision Stump, and J48 algorithms were used in this study. ZeroR algorithm is an algorithm that estimates the mean value of numerical test data and applies the basic algorithm rules [24]. OneR algorithm is one of the algorithms that tests property and generates a list of rules.

**Table 2.** Comparison of the performance of algorithms

<i>Algorithm</i>	<i>Test Mode</i>	<i>Number of Correctly Classified Instances</i>	<i>Number of Incorrectly Classified Instances</i>	<i>Accuracy Percentage</i>	<i>Working Duration (sec.)</i>
<i>ZeroR</i>	<i>Cross-Validation (10)</i>	<i>71184</i>	<i>175219</i>	<i>28.8893</i>	<i>0.11</i>
<i>ZeroR</i>	<i>Percentage Split (%66)</i>	<i>24149</i>	<i>59628</i>	<i>28.8253</i>	<i>0.32</i>
<i>OneR</i>	<i>Cross-Validation (10)</i>	<i>72921</i>	<i>173482</i>	<i>29.5942</i>	<i>0.27</i>
<i>OneR</i>	<i>Percentage Split (%66)</i>	<i>24775</i>	<i>59002</i>	<i>29.5726</i>	<i>0.29</i>
<i>Naive Bayes</i>	<i>Cross-Validation (10)</i>	<i>218964</i>	<i>27439</i>	<i>88.8642</i>	<i>0.23</i>
<i>Naive Bayes</i>	<i>Percentage Split (%66)</i>	<i>74489</i>	<i>9288</i>	<i>88.9134</i>	<i>1.60</i>
<i>Bayes Net</i>	<i>Cross-Validation (10)</i>	<i>219059</i>	<i>27344</i>	<i>88.9027</i>	<i>0.67</i>
<i>Bayes Net</i>	<i>Percentage Split (%66)</i>	<i>74547</i>	<i>9230</i>	<i>88.9827</i>	<i>0.94</i>
<i>Decision Stump</i>	<i>Cross-Validation (10)</i>	<i>135467</i>	<i>110936</i>	<i>54.9778</i>	<i>0.31</i>
<i>Decision Stump</i>	<i>Percentage Split (%66)</i>	<i>45982</i>	<i>37795</i>	<i>54.8862</i>	<i>0.16</i>
<i>J48</i>	<i>Cross-Validation (10)</i>	<i>197006</i>	<i>49397</i>	<i>79.9528</i>	<i>1.74</i>
<i>J48</i>	<i>Percentage Split (%66)</i>	<i>75215</i>	<i>8562</i>	<i>89.78</i>	<i>1.50</i>

Naive Bayes and Bayes Net algorithms, on the other hand, make statistical classifications to predict whether the data belong to a certain class or not. These algorithms are very successful in making decisions in uncertain situations [31,32]. The Decision Stump algorithm creates a single-level decision

tree and performs the classification process directly based on a single input feature value [24]. The J48 algorithm is a decision tree algorithm based on ID3 and C4.5 algorithms, and the information gain rate is used as the feature selection criterion in this algorithm [33]. If-Then rules are used in the tree structure and membership function sets are given as output. To create a simple classification model on the data, insignificant branches in the tree are cut by pruning [34].

Data preprocessing, cleaning, reduction, and transformation operations were performed on the data set to use it in algorithm analysis and get more accurate results. Accordingly, a data set with 9 attributes and 246403 rows was obtained. Information about this data set is given in Table 3. Two methods were used while creating the model. First, the Cross-Validation ratio was chosen as 10. Secondly, 66% of the data was used for training the model and the rest of the data was used for testing. These two methods were performed using each classification algorithms. The obtained network flow data were analyzed and compared with the specified algorithms. Information about the number of samples that were classified correctly and incorrectly, the correct classification rates of the algorithms, and the classification time of the algorithms are given in Table 2.

According to the information given in Table 2, the best result was obtained with the J48 algorithm (89.78%), as a result of comparing the accuracy performances of the algorithms used. Accuracy refers to the ratio of data perceived as accurate to the entire test data set. The higher the accuracy value, the more successful the machine learning model is [35]. The lowest accuracy rate was obtained with the ZeroR algorithm (28.8253%). J48 algorithm is the longest-running algorithm to make the classification. ZeroR is the algorithm that makes the classification in the shortest time.

## 5. EXPERIMENTAL RESULTS

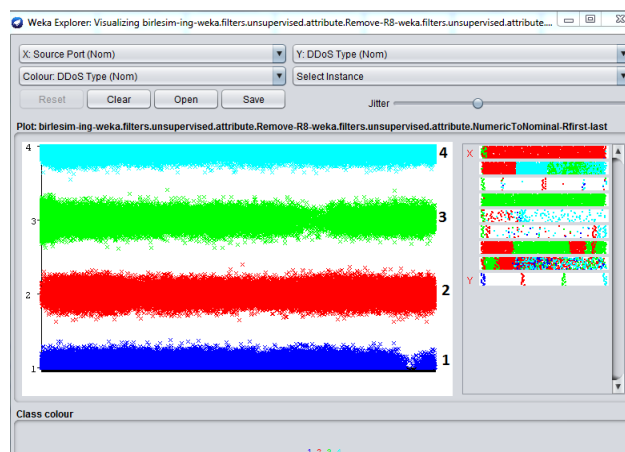
In the study, the visual results produced by Weka of the J48 algorithm with which the highest success rate was obtained are examined. The inferences from the reviews are given in this part. The values of each attack class and the methods used are given in Table 3 in detail.

**Table 3.** Values belonging to the attacks used in visual results

<i>Attack</i>	<i>Number Used in Visual Results</i>	<i>Colour Used in Visual Results</i>	<i>Packet Number</i>	<i>Packet Size (Largest)</i>	<i>Attack Time (sec.)</i>	<i>Maximum Delay Time of Next Packet (sec.)</i>
<i>TCP Flooding-1</i>	1	<i>Dark Blue</i>	25198	110	6.667	0.482
<i>TCP Flooding-2</i>			23557	113	7.994	0.974
<i>Total Packets for TCP Flooding</i>			48755			
<i>Spoofing IP-1</i>	2	<i>Red</i>	37902	182	8.828	0.925
<i>Spoofing IP-2</i>			26449	113	7.123	0.712
<i>Total Packets for Spoofing IP</i>			64351			
<i>SYN Flood with Spoofed IP-1</i>	3	<i>Green</i>	34367	105	10.664	2.056

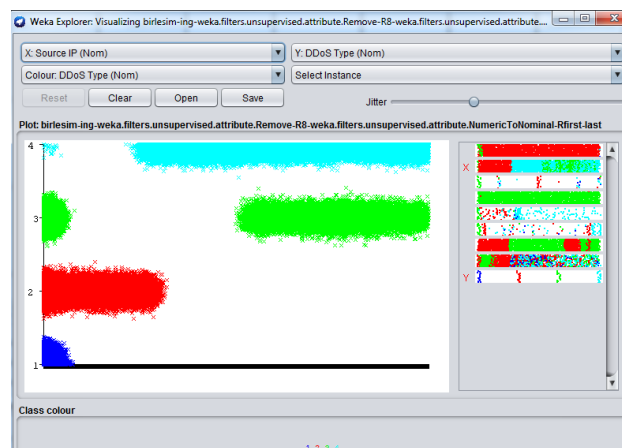
<i>SYN Flood with Spoofed IP-2</i>			27746	113	6.179	1.712
<i>Total Packets for SYN Flood with Spoofed IP</i>			62113			
<i>UDP Flooding-1</i>			36229	542	13.326	1.789
<i>UDP Flooding-2</i>	4	Blue	34955	298	20.323	3.169
<i>Total Packets for UDP Flooding</i>			71184			
<i>Total Packets for All Attacks</i>			246403			

To be used in visual results, numbers from 1 to 4 were made for TCP Flooding, Spoofing IP, SYN Flood with Spoofed IP, and UDP Flooding, respectively. Besides, coloring was done by indicating the number of packets used in the analysis. The maximum number of packets, packet size, attack time, and delay time were reached with UDP Flooding.



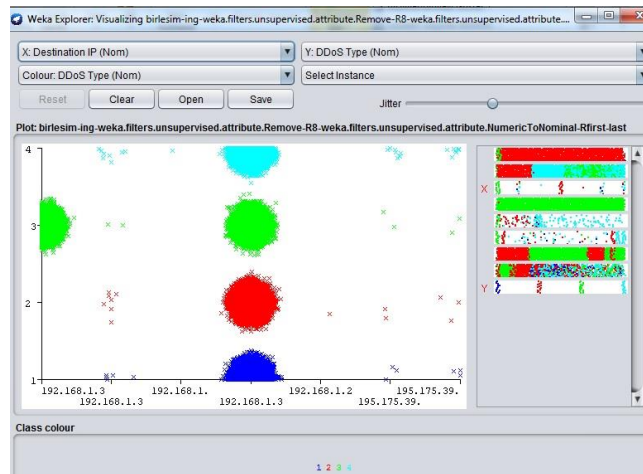
**Figure 5.** Visual of the source port value

When Figure 5 is examined, it is seen that the source port range of all attacks is very wide and varied. Almost all ports are used for every attack experiment.



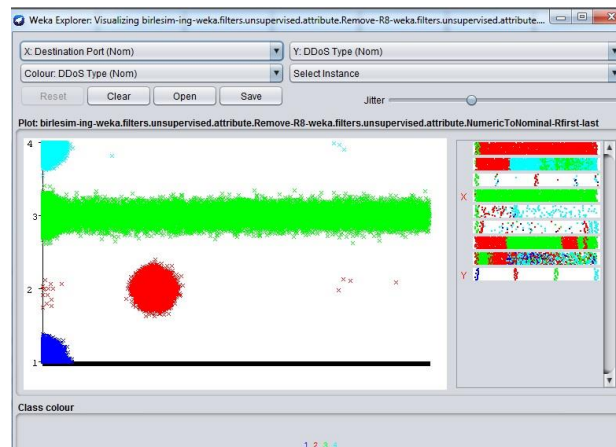
**Figure 6.** Visual of the source IP value

When we consider the source IPs, it was seen that very few IPs were used in the TCP Flooding. The IP range used in Spoofing IP is narrow. In SYN Flooding and UDP Flooding, the range of source IP used is wide and varied (this is more obvious especially for UDP Flooding).



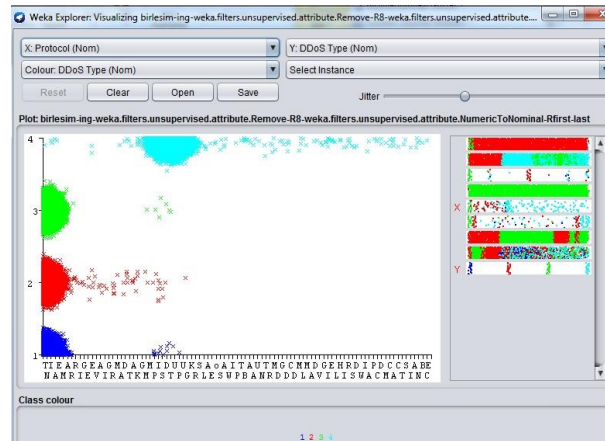
**Figure 7.** Visual of the destination IP value

The same IP was used as the target in all attack experiments, and the other IPs were rarely used, as can be seen in Figure 7. The target IP range is wider than the others in SYN Flooding.



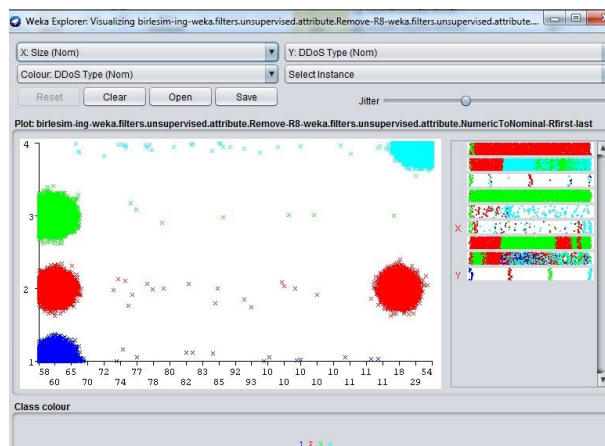
**Figure 8.** Visual of the destination port value

When we consider the target port, it has been observed that SYN Flooding has used almost all ports. The port range used in TCP and UDP floodings is very narrow and has not varied. In Spoofing IP, the destination port usage is in a wider range and more varied than TCP and UDP Floodings.



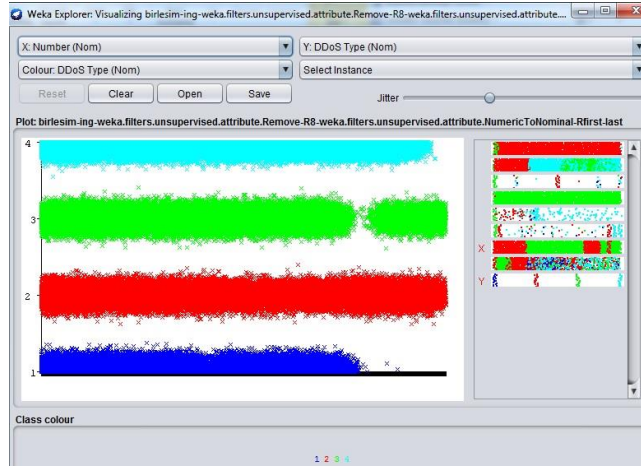
**Figure 9.** Visual of the protocol value

When we look at the protocols used in the attack experiments, it was seen that the protocols used in UDP Flooding were more and more varied. Protocols such as TCP, UDP, and DNS are frequently used in this attack. TCP Flooding, Spoofing IP, and SYN Flooding used similar protocols. These attacks focused on the TCP protocol and used very few different protocols.



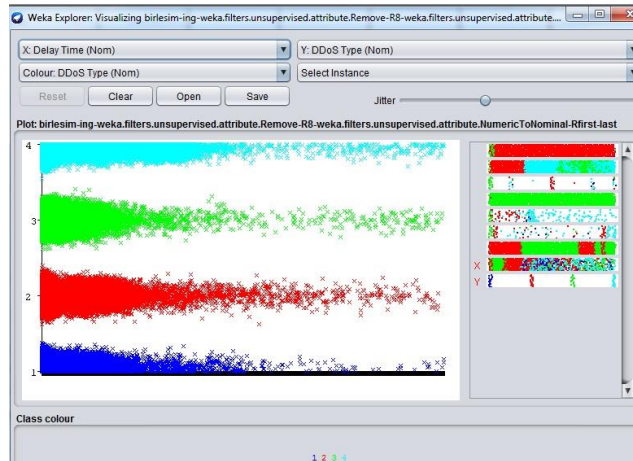
**Figure 10.** Visual of the size value

Based on Figure 10, it has been concluded that the size of the packet used at once in UDP Flooding is large. Also, a small number of sizes and different sizes were used. In the Spoofing IP, packets with different sizes were used. TCP and SYN Floodings used similar and smaller packet sizes.



**Figure 11.** Visual of the number value

When the value of the number of packets obtained in the attack experiments was examined, it was seen that the TCP Flooding had the least number of packets. The other three attacks have several packets that are close to each other.



**Figure 12.** Visual of the delay time value

When the delay time of the packets was examined, the highest values were reached with the UDP Flooding. The SYN Flooding has come in second place. Similar situations were observed for the other two attacks.

## 6. CONCLUSION

In this study, sample experiments have been performed by considering the important features of DDoS attacks. With these experiments, the attacker reached the target system and performed the desired operations. During these processes, the target system became inoperable and system performance was reduced to a minimum.

The data set was obtained by listening and evaluating the systems where different DDoS attack experiments were performed, and data analysis was performed by applying the selected methods. Different methods have been tried to detect DDoS attack types and the method with the highest result has been examined in detail. Studies have been performed on classification algorithms using the data mining method. According to the studies performed, the highest classification success rate was obtained with the J48 algorithm. The visual results obtained with this algorithm were discussed and detailed information

about the characteristics of each attack type was given. Unlike the studies in the literature [36-38], defining the type of attack and determining its characteristic features have been focused on.

This study on the detection of DDoS attack types applied to any system will be a guide to develop a detection mechanism against attacks. The same detection or protection method will not be the solution for every type of attack. For this reason, it is necessary to develop methods suitable for the type of attack to protect systems and to make quick decisions. With this study, a different perspective and solution are presented for the detection of DDoS attacks. In future studies, it is aimed to consider the normal network data which have not been attacked, to evaluate different features, and to make a more comprehensive analysis.

## REFERENCES

- [1] Kabakuş A. T., Kara R. (2016). DDoSdaps4web: Web'e Yönelik DDoS Tespit ve Koruma Yöntemi. Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 32(1), 1-9.
- [2] Devi S. R., Yogesh P. (2012). Detection of Application Layer DDoS Attacks Using Information Theory Based Metrics. Computer Science & Information Technology, Vol. 10, 217–223.
- [3] Baykara, M., Daş, R. (2017). A Novel Hybrid Approach for Detection of Web-Based Attacks in Intrusion Detection Systems. International Journal of Computer Networks and Applications, 4(2), 62-76.
- [4] Stein, L. D., Stewart, J. N., “The World Wide Web Security FAQ: Securing Against Denial of Service Attacks”, [www.w3.org/Security/Faq/wwwsf6.html](http://www.w3.org/Security/Faq/wwwsf6.html).
- [5] Gezgin, D. M., Buluş, E. (2014). Kablosuz Ağlar için Bir DoS Saldırısı Tasarımı. Bilişim Teknolojileri Dergisi, 6(3), 17-23.
- [6] Raza, A. (2012). Anomaly Detection Systems for Distributed Denial of Service Attacks. University of Sindh, the Department of Electrical and Computer Engineering, Master Thesis, Pakistan.
- [7] Wueest, C. (2014). Security Response: The Continued Rise of DDoS Attacks. Symantec White Paper, 1.
- [8] Sonar, K., Upadhyay, H. (2014). A Survey: DDoS Attack on Internet of Things. International Journal of Engineering Research and Development, 10(11), 58-63.
- [9] Çelikkilek, İ. (2016). TCP SYN Seli Saldırısının Etkilerini Azaltmak için Yeni SYN Çerezleri Gerçekleşmesi. İstanbul Şehir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- [10] Gregory, S. (2013). Preparing for the Next DDoS Attack. Network Security, 2013(5), 5-6.
- [11] Ingle, A., Awade, M. (2013). Intrusion Detection for TCP-SYN Flood Attack. International Journal of Advanced Research in Computer Science, 4(5) Special Issue, 9-11.
- [12] Duan, Z., Yuan, X., Chandrashekar, J. (2006). Constructing Inter-Domain Packet Filters to Control IP Spoofing Based on BGP Updates. In 25th IEEE International Conference on Computer Communications, Spain.
- [13] Pahwa, P., Tiwari, G., Chhabra, R. (2010). Spoofing Media Access Control (MAC) and Its Counter Measures. International Journal of Advanced Engineering & Application, 186-192.
- [14] Xie, Y., Yu, S. (2009). Monitoring the Application-Layer DDoS Attacks for IEEE. ACM Trans Netw, 17(1), 15-25.
- [15] Söğüt, E. (2016). Gelişmiş Israrıcı Tehdit Tespit Yöntemleri ve Bir Uygulaması. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara.

- [16] Cepheli Ö., Büyükçorak S., Karabulut K. G. (2014). Kullanıcı Modellemesi Tabanlı Dağıtık Servis Reddi Ataklarının Sezilmesi. In 22nd Signal Processing and Communications Applications Conference, 2186-2189, Trabzon.
- [17] Yuan, J., Mills, K. (2005). Monitoring the Macroscopic Effect of DDoS Flooding Attacks. IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing, 2(4), 324-335.
- [18] Shiaeles, S. N., Katos, V., Karakos, A. S., et al. (2012). Real Time DDoS Detection Using Fuzzy Estimators. Computers & Security, 31(6), 782-790.
- [19] Karimzad, R., Faraahi, A. (2011). An Anomaly-Based Method for DDoS Attacks Detection Using RBF Neural Networks. In International Conference on Network and Electronics Engineering, vol. 11, IACSIT Press, Singapore.
- [20] Al-Duwairi, B. N. (2005). Mitigation and Traceback Countermeasures for DDoS Attacks. Iowa State University, Doctoral Thesis, USA.
- [21] Limwiwatkul, L., Rungsawang, A. (2004). Distributed Denial of Service Detection Using TCP/IP Header and Traffic Measurement Analysis. In IEEE International Symposium Communications and Information Technology, vol. 1, 605–610, Japan.
- [22] Oo T. T., Phyu T. (2014). Analysis of DDoS Detection System Based on Anomaly Detection System. In International Conference on Advances in Engineering and Technology, Singapore.
- [23] Wireshark, [www.wireshark.org](http://www.wireshark.org).
- [24] Witten I. H., Frank E., Hall M. A., et al. (2016). Data Mining: Practical Machine Learning Tools and Techniques, Morgan Kaufmann, Fourth Edition, Boston.
- [25] KDD Cup 1999 Data, [kdd.ics.uci.edu/databases/kddcup99/kddcup99.html](http://kdd.ics.uci.edu/databases/kddcup99/kddcup99.html).
- [26] Roolvink, S. (2008). Detecting Attacks Involving DNS Servers. University of Twente, Design and Analysis of Communication Systems. Master Thesis, The Netherlands.
- [27] Erhan, D., Anarim, E., Kurt, G. K., Koşar, R. (2013). Effect of DDoS Attacks on Traffic Features. In 21st Signal Processing and Communications Applications Conference, Girne, 1-4.
- [28] Sahi, A., Lai, D., Li, Y., et al. (2017). An efficient DDoS TCP Flood Attack Detection and Prevention System in a Cloud Environment. IEEE Access, Vol. 5, 6036-6048.
- [29] Han, F., Xu, L., Yu, X., et al. (2016). Sliding-Mode Observers for Real-Time DDoS Detection. In IEEE 11th Conference on Industrial Electronics and Applications, 825-830, USA.
- [30] Osaniye, O., Choo, K. K. R., Dlodlo, M. (2016). Analysing Feature Selection and Classification Techniques for DDoS Detection in Cloud. In Southern Africa Telecommunication and Applications Conference, 198-203, South Africa.
- [31] Pala, T. (2013). Tıbbi Karar Destek Sisteminin Veri Madenciliği Yöntemleriyle Gerçekleştirilmesi. Marmara Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- [32] Kökver, Y., Barışçı, N., Çiftçi, A., Ekmekçi, Y. (2014). Hipertansiyona Etki Eden Faktörlerin Veri Madenciliği Yöntemleriyle İncelenmesi. Engineering Sciences, 9(2), 15-25.
- [33] Quinlan, J. R. (1986). Induction of Decision Trees. Machine learning, 1(1), 81-106.
- [34] Daş, B., Türkoğlu, İ. (2014). DNA Dizilimlerinin Sınıflandırılmasında Karar Ağacı Algoritmalarının Karşılaştırılması. Elektrik-Elektronik-Bilgisayar ve Biyomedikal Mühendisliği Sempozyumu, 381-383, Bursa.



- [35] Tekerek, A. (2021). A Novel Architecture for Web-Based Attack Detection Using Convolutional Neural Network. *Computers & Security*, 100, 102096, ISSN 0167-4048.
- [36] Tuan, T. A., Long, H. V., Son, L. H., et al. (2020). Performance Evaluation of Botnet DDoS Attack Detection Using Machine Learning. *Evolutionary Intelligence*, Vol. 13, 283-294.
- [37] Devi, B. S. K., Preetha, G., Selvaram, G., et al. (2014). An Impact Analysis: Real Time DDoS Attack Detection and Mitigation Using Machine Learning. In *International Conference on Recent Trends in Information Technology*, 1-7.
- [38] Doshi, R., Apthorpe, N., Feamster, N. (2018). Machine Learning DDoS Detection for Consumer Internet of Things Devices. In *IEEE Symposium on Security and Privacy Workshops*, 29-35.

## Design and Experimental Implementation of Passive Battery Management Systems Using ARM-Based Microprocessors

 Kübra KAYSAL<sup>1</sup> , Fatih Onur HOCAOĞLU<sup>1</sup> , Ahmet KAYSAL<sup>1,\*</sup> 
<sup>1</sup>Afyon Kocatepe University, Faculty of Engineering, Department of Electrical Engineering, 03200, Erenler, AFYONKARAHİSAR

### Graphical/Tabular Abstract

#### Article Info

Research article  
 Received:15/10/2020  
 Revision:27/11/2020  
 Accepted:26/01/2021

#### Highlights

- ARM Microprocessors.
- Passive BMS.
- UART Communication.

#### Keywords

Lithium Ion Battery Pack  
 Passive Balancing  
 Microcontroller  
 Battery Management System

In this study, a battery management system that allows the batteries to be charged in a balanced way using ARM-based microcontrollers has been proposed. Li-ion batteries have higher energy and power density than other battery types. However, it is dangerous due to risks such as explosion and ignition. With the help of the designed passive balancing circuit and battery management algorithm, the voltage value of each battery cell is measured, compared with other battery cells in the system, and in case the specified limits are exceeded, the charge current of the battery cell is controlled with the help of the MOSFET.

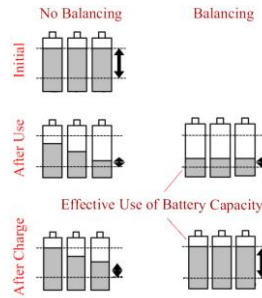


Figure A. General topology of the battery balancing system

**Purpose:** It is aimed to design a passive battery management system that can protect li-ion battery packs from overcharging and balance the amount of energy in the battery cells. Thus, the voltage and temperature values of the battery cells will be measured, and this will prevent them from being exposed to negative situations such as overcharging and high temperatures

**Theory and Methods:** In the BMS, the MOSFET is operated in the linear zone in order to keep the heat released on the bypass resistor under control and to minimize the energy loss. Battery balancing current is controlled by using the internal resistance of the MOSFET as the balancing resistance. In order for the MOSFET to operate in linear mode, a signal with a switching frequency of 1 kHz was produced using the PWM technique. In the study, analog data were transferred to the microcontroller using an analog to digital converter unit and a multiplexer. Thus, a balanced charge and discharge process of the cells was realized with passive balancing current.

**Results:** In this study, during the charging process of a li-ion battery pack with a capacity of 20s11p x 32 Ah, the MOSFETs of the cells whose cell voltage were higher than the balancing voltage determined in the algorithm were triggered. Thus, the balancing process was realized by completing the circuit through the balancing current, MOSFET internal resistance and bypass resistor. It has been observed that the balancing current of the battery groups reaches a maximum of 1,077 A and the temperature change between the cells is between 22 °C and 35 °C.

**Conclusion:** It has been observed that if BMS is not used during the charging process of the battery pack, the cell with a high SOC level reaches the maximum voltage level earlier, and therefore, if the charging process is continued, a higher temperature increase is experienced compared to the other battery cells. By using the PWM and the reducing converter topology, the MOSFET was operated in the linear region and the balancing current was controlled depending on the battery cell voltages. The designed BMS has shown that it balances the cell voltages depending on the reference voltage by using the balancing resistor and the internal resistance of the MOSFET, and that the battery pack is used within the safe operating area.



## Design and Experimental Implementation of Passive Battery Management Systems Using ARM-Based Microprocessors

Kübra KAYSAL<sup>1</sup> , Fatih Onur HOCAOĞLU<sup>1</sup> , Ahmet KAYSAL<sup>1,\*</sup> 

<sup>1</sup>Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, 03200, Erenler, AFYONKARAHİSAR

### Abstract

In this study, a battery management system using passive balancing technique is proposed in order to enable the batteries in the lithium-ion battery pack to be charged in a balanced way. Lithium-ion batteries have higher energy and power density than other battery types. Besides these advantages, it is dangerous due to risks such as explosion and ignition. Considering these effects, lithium-ion batteries need to be protected by specially designed circuits during the charging process. In this context, a passive battery management system that can protect battery groups from overcharging and balances the amount of energy in the battery cells has been introduced. The passive balancing circuit measures the voltage value of each battery cell, compares it with other battery cells in the system, and in case the specified limits are exceeded, the charge current of the battery cell is controlled by operating the switching element in the resistance area. In the designed battery management system, ARM based microcontrollers are used as master and slave. Thanks to the developed system, it is aimed to measure the voltage and temperature values of the batteries and prevent them from being exposed to negative situations such as overcharging and high temperature. Lithium-ion battery group with a capacity of 32 Ah, 20 series and 11 parallel, is used in the battery pack. In the study, analog data have been transferred to the microcontroller using an analog to digital converter unit and multiplexer. Thus, a balanced charge and discharge process of the cells has been realized with passive balancing current. It has been proven with the experimental results that the designed system works successfully.

### Makale Bilgisi

*Araştırma makalesi*  
*Başvuru: 15/10/2020*  
*Düzeltilme: 27/11/2020*  
*Kabul: 26/01/2021*

### Keywords

*Lithium Ion Battery Pack*  
*Passive Balancing*  
*Microcontroller*  
*Battery Management System*

### Anahtar Kelimeler

*Lityum İyon Batarya*  
*Pasif Dengeleme*  
*Mikrodenetleyici*  
*Batarya Yönetim Sistemi*

### Pasif Batarya Yönetim Sisteminin ARM Tabanlı Mikroişlemciler Kullanılarak Tasarımı ve Deneysel Uygulaması

#### Öz

Bu çalışmada, lityum-iyon batarya paketinde yer alan bataryaların dengeli bir şekilde şarj edilebilmesine olanak sağlamak amacıyla pasif dengeleme tekniği kullanan bir batarya yönetim sistemi önerilmiştir. Lityum-iyon bataryalar diğer batarya türlerine göre daha yüksek enerji ve güç yoğunluğuna sahiptir. Bu avantajlarının yanında patlama ve tutuşma gibi riskler nedeniyle tehlikelidir. Bu etkiler göz önüne alındığında lityum-iyon bataryaların şarj işlemi sırasında özel olarak tasarlanmış devrelerle korunmaları gerekmektedir. Bu kapsamda batarya gruplarını aşırı şarjdan koruyabilen ve batarya hücrelerindeki enerji miktarını dengeleyen bir pasif batarya yönetim sistemi sunulmuştur. Pasif dengeleme devresi her bir batarya hücresinin gerilim değerini ölçer, sistemdeki diğer batarya hücreleri ile karşılaştırır ve belirlenen limitlerin aşılması durumunda batarya hücresinin şarj akımı, anahtarlama elemanın direnç bölgesinde çalıştırılmasıyla kontrol edilir. Tasarlanan batarya yönetim sisteminde ana ve uydu olmak üzere ARM tabanlı mikrodenetleyiciler kullanılmıştır. Geliştirilen sistem sayesinde bataryaların gerilim ve sıcaklık değerleri ölçülerek, aşırı şarj ve yüksek sıcaklık gibi olumsuz durumlara maruz kalmasının önlenmesi hedeflenmiştir. Batarya paketinde, 20 seri ve 11 paralel olmak üzere 32 Ah kapasiteye sahip lityum-iyon batarya grubu kullanılmıştır. Yapılan çalışmada analog veriler, analog dijital dönüştürücü birimi ve çoklayıcı kullanılarak mikrodenetleyiciye aktarılmıştır. Böylece pasif dengeleme akımı ile hücrelerin dengeli bir şekilde şarj ve deşarj işlemi gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan sistemin başarılı bir şekilde çalıştığı elde edilen deneysel sonuçlar ile kanıtlanmıştır.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde çevre kirliliği ve nüfus yoğunluğunun artması ile birlikte fosil yakıtlara olan talep her geçen gün artmakta ve bu yakıtların olumsuz etkileri endişe verici bir hal almaktadır. Bu olumsuz etkilerin nedenleri arasında büyük bir etkiye sahip olan içten yanmalı motorlar yerine daha çevre dostu elektrikli araçların geliştirilmesi için çok sayıda çalışma yapılmaktadır. Elektrikli araçların yaygınlaşması ile birlikte şarj edilebilir batarya teknolojileri ve batarya yönetim sistemleri üzerinde çalışılan önemli bir konu haline gelmiştir. Elektrikli araçlarda kurşun asit, nikel kadmiyum, nikel metal hidrit, sodyum kükürt ve lityum iyon gibi çeşitli batarya teknolojileri kullanılmaktadır. Bu batarya çeşitleri arasında lityum iyon (li-ion) bataryalar diğer batarya türlerine kıyasla daha yüksek enerji ve güç yoğunluğuna sahip depolama teknolojisidir [1]. Ayrıca hafıza etkilerinin olmaması, uzun ömür döngüleri ve kurşun kadmiyum gibi çevreyi etkileyecek zararlı maddeler içermemesi bu batarya türünün avantajları arasında gösterilebilir.

Elektrikli araç uygulamalarında tek bir li-ion bataryanın sağladığı 4,2 V gerilim seviyesinden çok daha yüksek gerilim seviyelerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle elektrikli araçların enerji ihtiyacının tam olarak karşılanabilmesi için bataryaların seri olarak bağlanmaları gerekmektedir. Ancak hücre sayısındaki artış beraberinde bazı sorunlara neden olmaktadır. Bunların başında hücrelerin üretim ve montajındaki kusurlardan kaynaklı iç direnç farklılığı, kapasite, elektrik yük miktarı verimliliği (CE), şarj durumu (SOC), deşarj oranı (SD-rate) gibi başlangıç koşullarında değişikliklere neden olan faktörlerdir [2]. Elektrikli araç teknolojileri ile ilgili çalışmalar incelendiğinde yaşanan sorunların büyük bir kısmının bataryalarla ilgili olduğu görülmektedir. Bataryaların en önemli problemleri sınırlı ömürleri ve kontrol edilmediklerinde patlama risklerinin bulunmasıdır. Bu problemler çözülmesi gereken başlıca unsurlardır. Bu nedenle bataryaların uzun ömürlü olmaları ve daha verimli çalışmaları etkili bir batarya yönetim sistemine bağlıdır [3,4].

Batarya gruplarındaki gerilim dengesizliği sorununu çözmek için çeşitli batarya dengeleme topolojileri ve kontrol algoritmaları geliştirilmiştir [5-10]. Ekici ve Tan [11] tarafından yapılan çalışmada, dört farklı kimyasal yapıya sahip batarya türünün şarj ve deşarj karakteristikleri incelenmiştir. Bu batarya paketlerinin kontrolü aynı batarya yönetim sistemi (BMS) ile farklı şekillerde kontrol edilmiştir. Gerçekleştirilen batarya paketinin şarj işlemi DC/DC dönüştürücü kullanılarak gerçekleştirilmiş ve şarj sırasında sıcaklık ve şarj durumu (SOC) kontrolü yapılmıştır. BMS, hibrit elektrikli araç modeli üzerinde test edilmiştir. Muratoğlu ve Alkaya [12] tarafından yapılan çalışmada, li-ion bataryaların SOC kontrolünü gerçekleştirmek amacıyla kokusuz kalman filtresi ve genişletilmiş kalman filtresi algoritmaları kullanılmıştır. Bu iki modelin SOC kestirim sonuçları doğruluk ve performans açısından kıyaslanmış ve kokusuz kalman filtresinde daha başarılı sonuçlar elde edildiği görülmüştür. Zhu ve arkadaşları [13] çalışmalarında, lityum kobalt oksit bataryalardan oluşan bir BMS oluşturmuş ve bataryalar için kombine şarj durumu tahmin yöntemi ve pasif denge kontrolü gerçekleştirmişlerdir. Donanımsal ve yazılımsal bir deney platformu oluşturularak 3,4 Ah'lık lityum kobalt oksit bataryanın 80 dakikalık şarj işleminden sonra kümülatif hatada azalma gözlenmiştir. Benzer şekilde, deneysel sonuçlar incelendiğinde pasif dengeleme kontrolünün uzun kullanım sürecinde batarya paketinin kararlılığını etkili bir şekilde iyileştirmiştir. Duan ve arkadaşları [14] çalışmalarında elektrikli araçlar için güneş enerjisi destekli BMS gerçekleştirmişler ve batarya dengeleme için aktif/pasif kontrol tekniklerini incelemişlerdir. Elde edilen deneysel sonuçlara göre önerilen sistemin her 13,2 km'de 50 Ah batarya paketinin toplam kapasitesini %2,1 ile %3,3 oranında iyileştirdiğini göstermişlerdir.

Kontrol algoritmalarının yanı sıra batarya dengeleme topolojilerinden biri olan pasif dengeleme yöntemi basit, uygulaması kolay ve düşük maliyet gibi avantajları nedeniyle yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biridir. Kılıç ve arkadaşları [15] çalışmalarında, ana ve uydu denetleyiciler arasında CAN haberleşme protokolü kullanan ve pasif dengeleme metodu içeren BMS tasarlamışlardır. Elektrikli araç uygulamaları için tasarlanan BMS, aşırı şarj, derin deşarj, yüksek akım ve yüksek sıcaklık gibi olumsuz koşullarda batarya paketini koruduğunu göstermiştir. Daowd ve arkadaşları [16] çalışmalarında, aktif ve pasif batarya dengeleme metodlarını Matlab/Simulink ortamında modelleyerek karşılaştırmasını yapmışlardır. Her bir dengeleme metodunu maliyet, boyut ve kontrol bakımından incelemişler ve kendi içerisinde avantaj ve dezavantajlarını ortaya koymuşlardır. Amin ve arkadaşları [17] çalışmalarında, LiFePO<sub>4</sub> batarya hücreleri ve pasif dengeleme tekniği kullanan bir BMS tasarlamışlardır. Dengeleme direnci olarak metal oksit alan etkili transistörün (MOSFET) iç direncini kullanmışlardır. Tasarlanan BMS'in, referans dengeleme

gerilimine bağlı olarak hücre gerilimlerinin dengeli bir şekilde şarj olduklarını ve MOSFET iç direncinin kullanılmasıyla BMS donanımında yer tasarrufu sağlandığını göstermişlerdir. Kokila ve arkadaşları [18] çalışmalarında, hibrit çok seviyeli dönüştürücü kullanarak batarya yönetim sistemi geliştirmişlerdir. Deşarj sırasında sabit çıkış voltajı elde etmek için hibrit çok seviyeli dönüştürücü, yardımcı batarya ile birlikte kullanılmıştır. Önerilen yöntem ile hücrelerin gerilim seviyeleri ve SOC dengelenmiş, aşırı şarj ve derin deşarjdan kaçınılmıştır. Frost ve Howey [19] tarafından yapılan çalışmada, dağıtılmış denetleyici ile modüler çok düzeyli bir dönüştürücü topolojisine dayalı iletişim gereksinimi olmayan bir BMS tasarlanmıştır. Önerilen yöntem ile çıkış gerilim dalgalanmaları en aza indirilerek SOC doğru bir şekilde senkronize edilmiştir.

Bu çalışmada li-ion batarya paketinde yer alan bataryaların dengeli bir şekilde şarj edilebilmesini sağlamak amacıyla pasif dengeleme tekniği kullanan bir BMS tasarlanmış ve deneysel çalışmaları gerçekleştirilmiştir. BMS'in kontrol ve güç katı arasında optik izolatörler kullanılarak yalıtımı sağlanmıştır. Batarya paketinin sıcaklık, akım ve gerilim verileri, mikrodenetleyicinin analog dijital dönüştürücü (ADC) kanalı kullanılarak 12 bit çözünürlükte okunmaktadır. Zhu [13] ve Kılıç [15] tarafından gerçekleştirilen çalışmalardan farklı olarak, BMS şarj işlemi sırasında, güç direncinin yanı sıra MOSFET'in iç direnci kullanılmıştır. Bu sayede gerilim seviyesi yüksek olan batarya hücrelerinin şarj akımları kontrol edilmiştir. Ayrıca uygulanan enerjinin hiçbir aktif rolü olmayan direnç üzerinde tüketilerek yok edilmesinin önüne geçilmiştir. Benzer şekilde Kıvrak [3] ve Amin [17] tarafından gerçekleştirilen çalışmalara ek olarak batarya hücrelerinin gerilim ve sıcaklık verileri evrensel asenkron alıcı-verici (UART) ve seri çevre arayüzü (SPI) haberleşme protokolleri kullanılarak 7-inç TFT monitörde izlenmesi sağlanmış ve kablosuz ağ modülü kullanılarak eş zamanlı kayıtlar bilgisayar ortamında saklanmıştır.

## 2. MATERYAL VE METOT (MATERIAL AND METHOD)

### 2.1. Batarya Paketi Tasarımı (Battery Pack Design)

Bataryalar, elektrikli araç uygulamaları için temel enerji kaynağıdır ve batarya seçimi araç performansını etkileyen önemli bir faktördür. Batarya seçiminde dikkat edilmesi gereken faktörler arasında hızlı şarj işlemine müsaade etmesi, hafıza etkisinin olmaması, bataryanın düşük iç dirence sahip olması, yüksek enerji ve güç yoğunluğuna sahip olması, yüksek şarj-deşarj döngüsü, düşük maliyet ve yüksek güvenilirlik bulunmaktadır. Bu avantajları nedeniyle çalışmamızda li-ion bataryalar tercih edilmiştir. Tablo 1'de tek bir batarya hücrelerinin ve tüm batarya paketinin teknik özellikleri verilmiştir.

**Tablo 1.** NCR18650B Li-ion batarya ve batarya paketinin teknik karakteristiği

<i>Parametre</i>	<i>Hücre</i>	<i>Paket</i>
Minimum kapasite (25 °C)	2.9Ah	32Ah
Nominal gerilim	3.6V	72V
Şarj gerilimi	4.2V	84V
Hücre ağırlığı (maks.)	47.5g	< 10 Kg
Gravimetrik enerji yoğunluğu	243Wh/Kg	243Wh/Kg
Deşarj sıcaklığı	-20 ~ +60 °C	-20 ~ +60 °C
İç direnç	< 2mΩ	< 24.8mΩ

Li-ion bataryaların termal kararlılığı diğer batarya gruplarına göre daha iyi olmasına rağmen şarj ve deşarj kesintileri kontrol altında tutulmalıdır. Aksi takdirde aşırı şarj elektrolit oksidasyonuna neden olurken, aşırı deşarj katot yapısal değişiklikler meydana getirir [20]. Şekil 1'de görülen batarya kümesinde 20 batarya paketi seri ve her seri pakette 11 batarya hücresi birbiri ile paralel olarak bağlanmıştır.



Şekil 1. Batarya hücrelerinin hiyerarşik yapısı

## 2.2. Li-ion Batarya için SOC Tahmin Yöntemi (SOC Estimation Method for Li-ion Battery)

BMS, bataryaların akım, sıcaklık ve gerilim durumlarına göre bataryalarda ne kadar enerji kaldığını hesaplayan, bataryaların kontrol ve takibini sağlayan bir sistemdir. BMS sayesinde bataryalar korunmakta ve performansı iyileştirilmektedir. Bir bataryanın kalan enerjisini doğru tahmin etmek bataryaların aşırı şarj edilmesini önleyip ömrünün uzatılmasını sağlar. Bir batarya tamamen şarj edildiğinde kapasitesi %100, tamamen deşarj edildiğinde ise %0 olarak kabul edilir. SOC tahmin bilgileri bir elektrikli aracın şarj dengeleme ve batarya yönetimi için oldukça önemlidir. BMS, hücre gerilimi, akımı ve sıcaklık verilerine bağlı olarak batarya paketinin kalan enerjisi hesaplanabilir. Böylece sisteme kaç saat daha enerji sağlayabileceği tahmin edilmiş olur. Batarya paketinin SOC tahmini yük sayma metoduna göre Eşitlik 1’de verilmiştir.

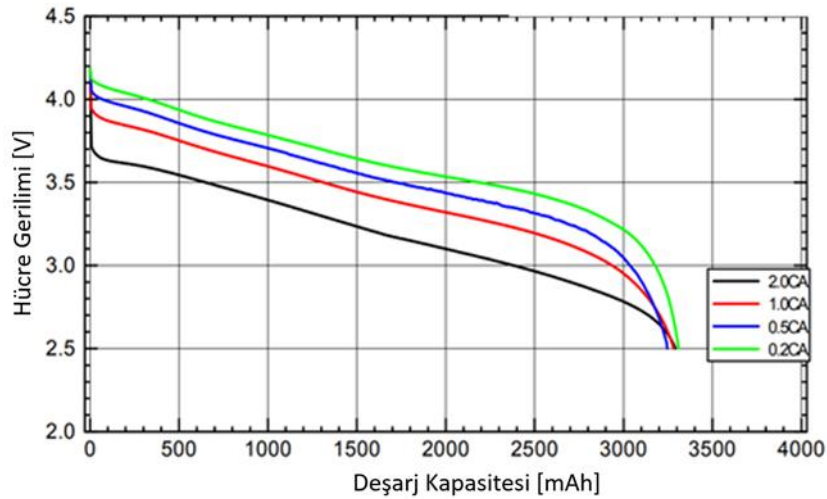
$$SOC(t) = SOC(t - 1) + \int_0^t \frac{I_{batt}}{C_{batt}} dt \quad 1$$

Burada  $SOC(t - 1)$ ,  $I_{batt}$  batarya akımı uygulanmadan önceki SOC (%) başlangıç değeridir.  $C_{batt}$  bataryanın nominal kapasitesi (Ah) ve  $t$ , zamanı (h) ifade etmektedir. Batarya hücrelerinin güvenliği ve verimliliği açısından kontrol algoritması belirlenen limitlere göre işletilmelidir. Algoritmada belirlenen limitler Eşitlik 2 ile ifade edilir.  $SOC_{min}$  ve  $SOC_{max}$ , bataryanın izin verilen minimum ve maksimum şarj durumlarıdır.

$$SOC_{min} < SOC < SOC_{max} \quad 2$$

## 2.3. Gerilim, Akım ve Sıcaklık Koruma (Voltage, Current and Temperature Protection)

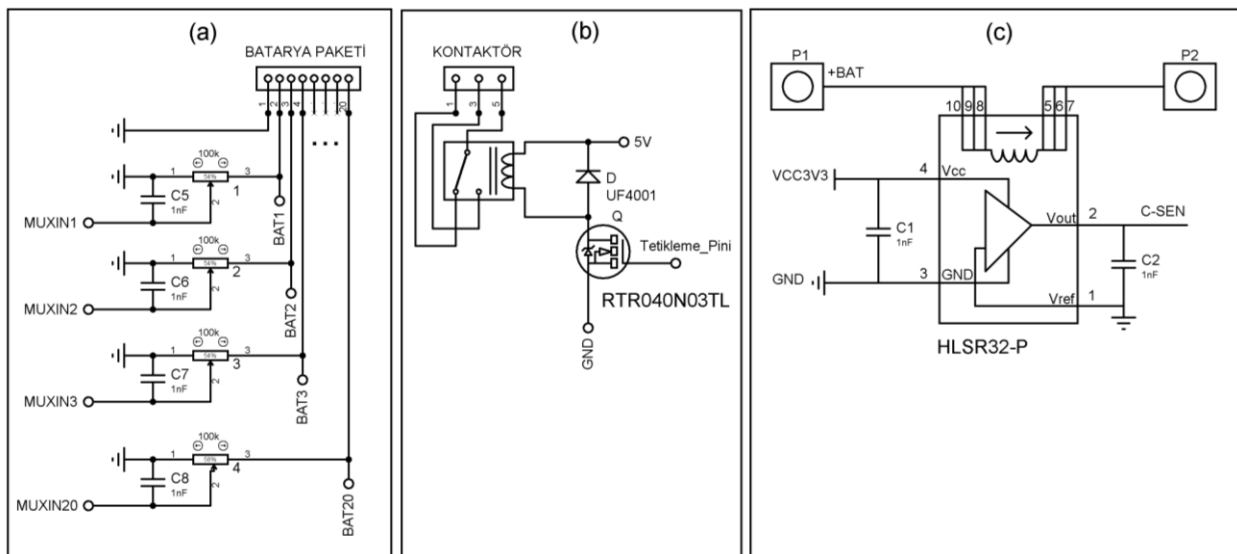
Batarya paketinin güvenli bir şekilde kullanılmasını sağlamak için gerilim, akım ve sıcaklık bilgileri sürekli kontrol edilmelidir. Bu değerlerin belirlenen limitler dışına çıkması durumunda batarya hücreleri zarar görebilir. Batarya paketinde kullanılan Panasonic firmasının üretmiş olduğu NCR18650PF li-ion batarya hücrelerinin deşarj karakteristiği Şekil 2’de verilmiştir. Deşarj karakteristiği incelendiğinde batarya hücrelerinin şarj gerilimi seviyesi 2.5V ile 4.2V aralığında tutulması gerektiği görülmektedir.



Şekil 2. Batarya hücresinin deşarj karakteristiği (Sıcaklık: 25 °C)

Hücre gerilimlerinin STM32F446 mikrodenetleyicisine aktarılması Şekil 3 (a)'da verilen gerilim bölücü devresi ile gerçekleştirilmiştir. Bu devre üzerinde güç tüketiminin azaltılması ve batarya gerilimlerinin doğru bir şekilde okunması amacıyla yüksek direnç ve düşük tolerans değerine sahip dirençler kullanılmıştır. Çoklayıcıdan mikrodenetleyiciye aktarılan analog hücre gerilimleri ADC kanalı tarafından 12 bit çözünürlükte okunmuştur. Analog sinyalin, çevre koşullarından ve elektromanyetik girişimden etkilenmemesi amacıyla alçak geçiren RC filtre kullanılmıştır.

Batarya paketindeki hücre gerilimleri ve sıcaklıklarının limit değerlerin dışına çıkılması durumunda Şekil 3 (b)'de devre yapısı görülen devre kesici tetiklenerek şarj işlemi sonlandırmakta ve yükü batarya paketinden ayırmaktadır. Her bir seri hücre paketine yerleştirilmiş olan LM35 sıcaklık sensöründen elde edilen sıcaklık/volt sinyali ADC kanalı tarafından okunmaktadır. Sıcaklığa bağlı limit değerler batarya hücresinin teknik özellikleri esas alınarak  $-20 \sim +60$  °C aralığında sınırlandırılmıştır. BMS, batarya paketlerinin sıcaklık değerlerine bağlı olarak 50 °C'ye ulaşması durumunda alarm, 60 °C'de ise açtırma komutu göndermektedir. Benzer şekilde batarya grubundan çekilecek akım, Şekil 3(c)'de bağlantı şeması görülen nominal 32 A ölçüm değerine sahip HLSR32-P akım sensörü vasıtasıyla mikrodenetleyici tarafından anlık olarak takip edilmektedir.



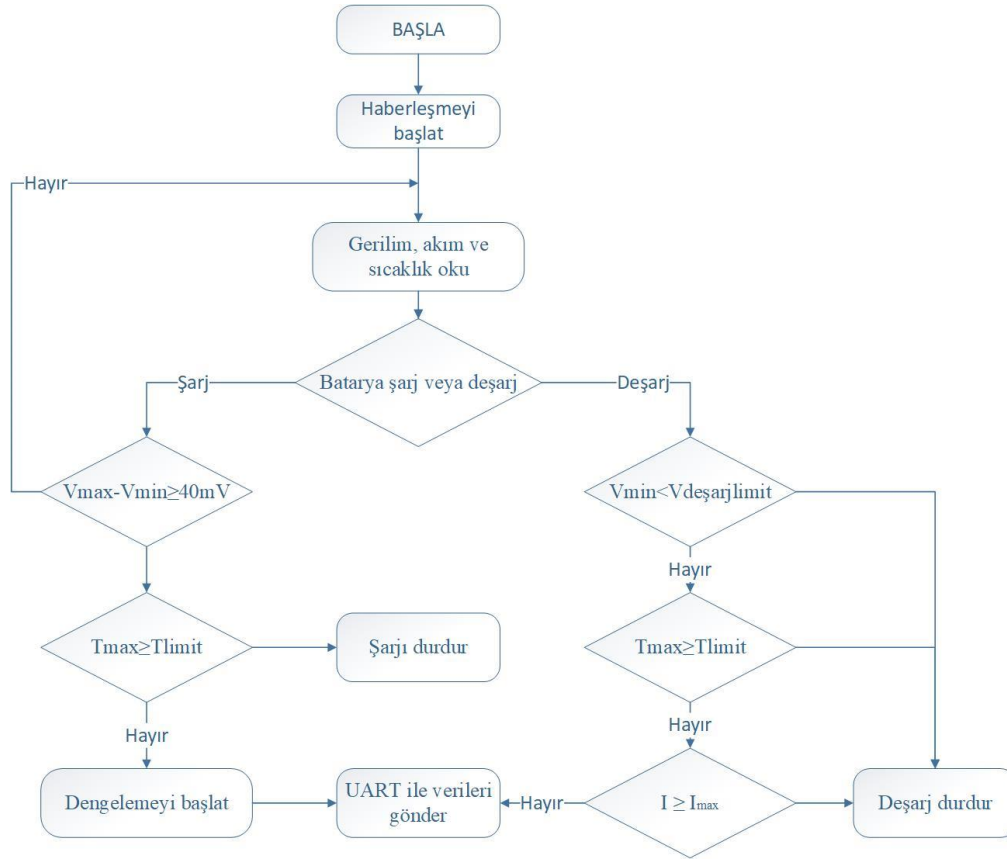
Şekil 3. (a) Gerilim algılama devresi, (b) alarm/trip devre yapısı ve (c) akım sensörü bağlantı şeması





## 2.5. Batarya Yönetim Sistemi Algoritması (Battery Management System Algorithm)

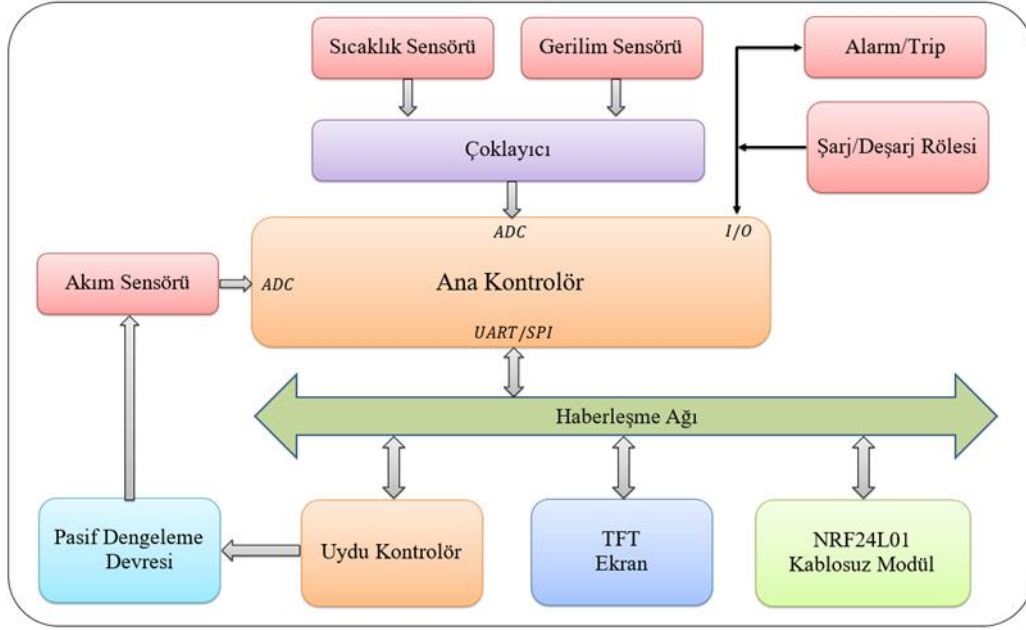
BMS'nin kontrol edilmesinde ana kontrolör olarak STM32F446 mikrodenetleyicisi kullanılmıştır. Ana kontrolör, zamanlayıcı ve seri iletişim protokollerini barındırır. BMS çalıştırıldığında, batarya hücrelerinin gerilimleri ve sıcaklık verileri ana kontrolör tarafından işletilir. Bu algoritmanın akış diyagramı Şekil 6'da görülmektedir.



Şekil 6. Batarya yönetim sistemine ait akış diyagramı

Mikrodenetleyicilerde ADC modülünün pin sayısı sınırlı olmasından dolayı gerilim ve sıcaklık verileri CD4067 çoklayıcı entegresi kullanılarak mikrodenetleyiciye aktarılmıştır. Ayrıca ana kontrolör, BMS tarafından yürütülen işlemleri ve batarya hücrelerinin verilerini UART protokolü ile TFT ekrana göndermektedir. Ana kontrolörün gerçekleştirdiği diğer bir işlem, elde edilen verilerin eş zamanlı kayıtlarının bilgisayar ortamında saklanmasıdır. UART haberleşme protokolü üzerinden NRF24L01 kablosuz ağ modülü kullanılarak BMS'ye ait tüm veriler bilgisayar ortamına aktarılmaktadır.

Batarya paketindeki hücreler arasında gerilim farkı 40 mV üzerinde olan hücreler belirlenir ve bu veriler dengeleme işleminin başlatılması için uydu mikrodenetleyiciye aktarılır. Aynı zamanda tüm hücre sıcaklıkları ana kontrolör tarafından işletilmektedir. Hücre sıcaklıklarından herhangi birisinin belirlenen limit değere ulaşması halinde koruma prosedürü işletilir. Benzer şekilde uydu kontrolör üzerinde bulunan akım sensörü, bataryaların deşarj akımının maksimum limitine ulaşması durumunda devre kesiciye açtırma komutu göndererek batarya paketi ile yükün birbirinden ayrılması sağlar. Şekil 7'de ana ve uydu denetleyiciye ait blok diyagram görülmektedir. Ayrıca uydu kontrolör olarak görev yapan STM32F070 mikrodenetleyicisi BMS'nin alt bileşenlerindedir. Batarya hücreleri üzerinde bulunan pasif dengeleme devreleri uydu kontrolör tarafından kontrol edilmektedir. SOC seviyesinin belirlenmesi ve aşırı akım takibinin yapılabilmesi için üzerinde bulunan akım sensörü, ana kontrolöre veri akışını sağlamaktadır.



Şekil 7. Önerilen batarya yönetim sisteminin genel topolojisi

## 2.6. Veri İzleme ve Haberleşme (Data Monitoring and Communication)

Şekil 7’de verilen blok diyagramdan görüleceği üzere, ana kontrolör 7-inch TFT ekran ve uydu kontrolör ile UART haberleşme protokolünü kullanırken, NRF24L01 kablosuz modül SPI haberleşme protokolünü kullanmaktadır. Hücre gerilimleri, sıcaklıkları, SOC durumu, batarya paketinden çekilen toplam akım, alarm ve açtırma gibi tüm BMS verileri kullanıcı arayüzünün ekranında görüntülenir. Ana ve uydu kontrolörler iletişim için birbirinden izole edilmelidir. Bu nedenle BMS devrelerinin haberleşme portları PC817 optik izolatör entegresi aracılığıyla birbirinden izole edilmiştir. Batarya paketindeki verilerin izlendiği TFT ekranın ilk satırlarında batarya kapasitesi, arıza durumu gibi bilgiler yer alırken, diğer kısımlar 2 ana sütuna bölünmüştür. İlk sütunda 20 seri hücre paketinin nominal gerilimleri, ikinci sütunda sıcaklık değerleri gözlenmektedir. TFT ekrana ait görüntüler Şekil 8 (b)’de görülmektedir.

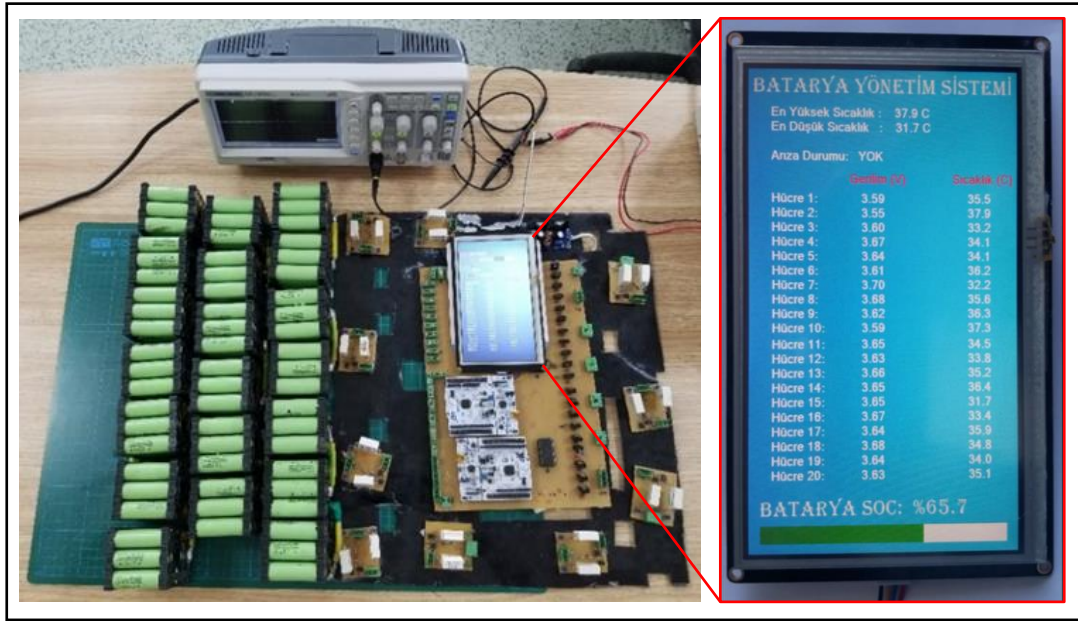
## 3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Tasarlanan batarya yönetim sisteminde ana ve uydu olmak üzere STM32F446 ve STM32F070 mikrodenetleyicileri kullanılmıştır. Test edilen batarya paketinde, 20 seri ve 11 paralel olmak üzere 32 Ah kapasiteye sahip li-ion batarya grubu kullanılmıştır. İlk olarak, paketlenen batarya grubu 700 W güce sahip yarım köprü DC/DC dönüştürücü kullanılarak şarj edilmiştir. Şarj akımı yaklaşık olarak 10 A seviyelerindedir. BMS çalıştırıldığında tasarlanan algoritmaya göre batarya hücreleri arasındaki en düşük gerilime sahip hücre belirlenerek diğer hücrelerle karşılaştırılmaktadır. Böylece belirlenen maksimum gerilim limitini aşan hücrenin dengeleme işlemi başlatılır. Dengeleme devresinde kullanılan RTR040N03 MOSFET, küçük yüzey montaj paketi ve 48 mΩ gibi düşük ileri yön ( $R_{DS_{on}}$ ) direnci nedeniyle tercih edilmiştir. Bir batarya hücresinin dengeleme akımı, MOSFET’in gate-source pinleri arasındaki gerilim ( $V_{GS}$ ) değişimlerine bağlı olarak  $R_{DS_{on}}$  direncindeki değişimler Tablo 2’de verilmiştir. Buna göre  $V_{GS}$  geriliminin artmasıyla  $R_{DS_{on}}$  direncinin azaldığı görülmektedir.  $V_{GS}$  gerilimi 1,5 V olarak uygulandığında MOSFET neredeyse kesimdedir.  $V_{GS}$  gerilimi 2,5 V olarak uygulandığında ise  $R_{DS_{on}}$  direnci 65 mΩ olarak ölçülmüş ve MOSFET iletim durumundadır.

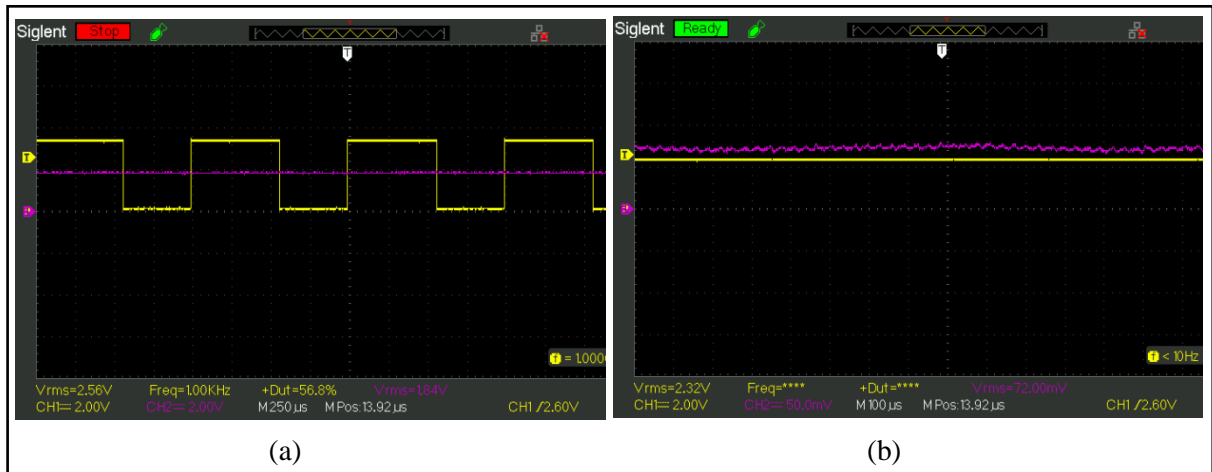
Batarya hücrelerinin şarj işlemi sırasında MOSFET’in iletim durumuna geçmesiyle birlikte  $V_{GS}$  gerilimine bağlı olarak ilgili hücrenin şarj akımının bir miktarı MOSFET ve bypass direnci üzerinde kontrollü bir şekilde harcanır. Böylece hücrenin SOC seviyesi, batarya paketinin diğer hücrelerinin SOC seviyesi ile eşitlenmesi sağlanır. Şekil 8’de önerilen batarya yönetim sisteminin deneysel uygulaması görülmektedir.

**Tablo 2.**  $V_{GS}$  gerilimindeki değişimlere bağlı olarak MOSFET'in  $R_{DSon}$  direnç değerleri

$V_{GS}$ (V)	$R_{DSon}$ ( $\Omega$ )
1,50	18,47 K
1,68	768
1,84	65
2,00	9,20
2,08	5,90
2,24	2,20
2,32	0,25
2,50	0,065

**Şekil 8.** (a) 20s11p x 32 Ah li-ion hücrelerden oluşan BMS deney düzeneği (b) BMS kullanıcı arayüzü

Şekil 9 (a)'da azaltan dönüştürücü girişine 1 kHz anahtarlama frekansına sahip %56.8 doluluk oranında PWM sinyali uygulanmıştır. Dönüştürücü çıkışından MOSFET'in tetikleme terminaline uygulanmak üzere 1,84 V gerilim sinyali elde edildiği görülmektedir.

**Şekil 9.** (a) Azaltan dönüştürücü girişine uygulanan PWM sinyali (CH1), dönüştürücü çıkışından elde edilen  $V_{GS}$  gerilimi (CH2), (b) MOSFET'in tetikleme terminaline uygulanan  $V_{GS}$  gerilimi (CH1), MOSFET üzerinden geçen dengeleme akımı (CH2).

Şekil 9 (b)'de  $V_{GS}$  geriliminin 2,32 V olması durumunda  $0,25 \Omega$ 'luk iç dirence sahip olan MOSFET ve  $3,9 \Omega$  değerindeki bypass direnci üzerinden geçen dengeleme akımının  $0,72$  A seviyesinde olduğu görülmektedir. BMS'e ait tüm veriler UART haberleşme protokolü üzerinden kablosuz modül kullanılarak eş zamanlı kayıtlar bilgisayar ortamında saklanmakta ve kullanıcı arayüzü sayesinde anlık olarak gözlemlenmektedir. Bilgisayar ortamındaki kullanıcı arayüzü Şekil 10'da görülmektedir. Tasarlanan arayüz sayesinde her batarya hücrelerinin şarj dengeleme gerilimleri ve sıcaklıkları takip edilmektedir. Böylece batarya hücrelerinde meydana gelebilecek olası sorunlar önceden belirlenerek müdahale edilebilmektedir.

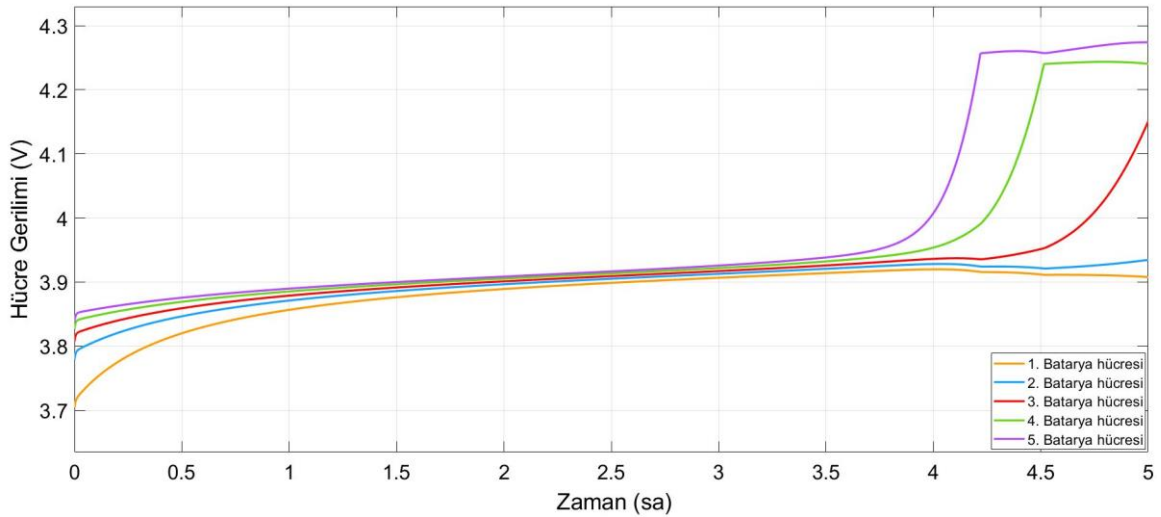


Şekil 10. Batarya yönetim sisteminin bilgisayar ortamındaki arayüz programı

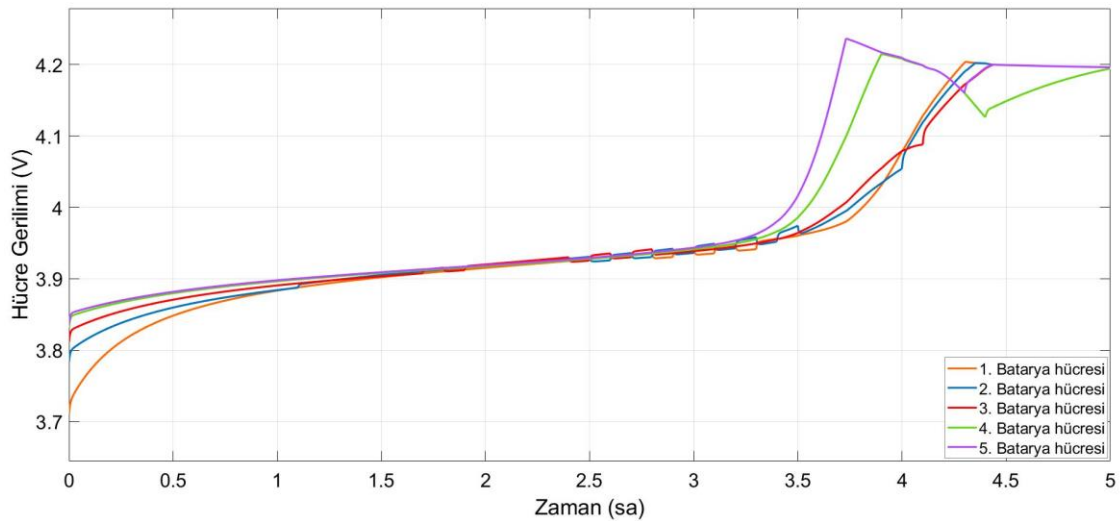
DeneySEL çalışma sırasında, batarya gerilimindeki dengesizliğin fazla olduğu yani SOC seviyeleri birbirinden farklı olan beş batarya hücresi seçilmiş ve şarj işlemi sırasında elde edilen hücre gerilimleri grafik üzerinde çizdirilmiştir. İlk olarak önerilen algoritma olmadan şarj işlemi yapıldığında hücre gerilimlerine ait grafik elde edilmiş ve zamana bağlı gerilim değerleri Şekil 11'de verilmiştir. Şarj başlamadan hemen önce hücre gerilimleri  $3,70$  V –  $3,78$  V –  $3,80$  V –  $3,83$  V –  $3,86$  V olarak ölçülmüş ve sırasıyla numaralandırılmıştır. Grafik incelendiğinde SOC seviyesi en yüksek olan 5 nolu batarya hücresi 4,22 saat ve 4 nolu batarya hücresi 4,5 saat süre sonunda %100 SOC seviyesine ulaşmıştır. Ancak şarj işleminin sonlandırıldığı 5. saat sonunda 1, 2 ve 3 nolu batarya hücrelerinin %100 SOC seviyesine ulaşamadığı, dolayısıyla tamamen şarj olmadıkları görülmüştür. Şarj süresi boyunca hücre sıcaklıkları değişimi  $21^{\circ}\text{C}$  ile  $40^{\circ}\text{C}$  aralığında olduğu gözlenmiştir.

Başlangıç koşulları aynı olacak şekilde önerilen algoritma kullanılarak gerçekleştirilen şarj işlemi sırasında elde edilen hücre gerilimlerinin zamana bağlı değişimi Şekil 12'de verilmiştir. Şarj işlemi sırasında hücre gerilimi, algoritmada belirlenen dengeleme geriliminden daha yüksek olan hücrelerin MOSFET'leri tetiklenmiştir. Böylece dengeleme akımı, MOSFET iç direnci ve bypass direnci üzerinden devresini tamamlayarak dengeleme işlemini gerçekleştirmiştir. Batarya gruplarının dengeleme akımı maksimum  $1,077$  A'e kadar çıktığı ve hücreler arasındaki sıcaklık değişiminin  $22^{\circ}\text{C}$  ile  $35^{\circ}\text{C}$  aralığında olduğu gözlenmiştir.

Algoritmada belirlenen dengeleme gerilim değeri, etkili bir şarj işlemi için  $40$  mV olarak belirlenmiştir. Şekil 12 incelendiğinde birbirinden farklı SOC seviyelerine sahip batarya hücreleri, şarj işlemi başladıktan 4.5 saat sonra %100 SOC seviyesine ulaşmıştır. Şarj işlemi yaklaşık 5 saat sürmüş ve şarj süresi boyunca BMS, hücre gerilimlerinin dengelenmesi işlevini başarılı bir şekilde gerçekleştirmiştir.



**Şekil 11.** Önerilen algoritma olmadan şarj işlemi gerçekleştirildiğinde batarya hücre gerilimlerinin zamana bağlı değişimi



**Şekil 12.** Önerilen algoritma ve BMS kullanılarak şarj işlemi gerçekleştirildiğinde batarya hücre gerilimlerinin zamana bağlı değişimi

#### 4. SONUÇ (CONCLUSION)

Mikro şebeke yapıları ve elektrikli araçlar gibi önemli uygulama alanlarında kullanılan BMS, hücre dengeleme, batarya sisteminin güvenilirliği ve daha uzun batarya ömrü gibi katkılarından dolayı günümüzde yaygın olarak çalışılan bir konudur. Bu çalışmada, 20s11p x 32 Ah kapasiteye sahip li-ion batarya paketinin pasif dengeleme tekniği kullanılarak dengeli bir şekilde şarj edilebilmesi amacıyla BMS tasarlanmış ve deneysel uygulaması gerçek zamanlı sistem üzerinde test edilmiştir. Deney sonuçlarına göre, hücreler arasındaki gerilim farkı büyüdükçe dengeleme süresinin uzadığı gözlenmiştir. Batarya paketinin şarj işlemi sırasında BMS kullanılmadığı takdirde SOC seviyesi yüksek olan hücrenin daha erken maksimum gerilim seviyesine ulaştığı ve dolayısıyla şarj işlemine devam edildiği takdirde diğer batarya hücrelerine oranla daha fazla sıcaklık artışının yaşandığı gözlenmiştir. Aynı zamanda belirlenen şarj süresi boyunca sadece iki batarya hücresinin %100 SOC seviyesine ulaştığı, diğer batarya hücrelerinin tam şarj kapasitesine ulaşamadığı görülmüştür.

Darbe genişlik modülasyonu ve azaltan dönüştürücü topolojisinin kullanılmasıyla MOSFET lineer bölgede çalıştırılmıştır. Batarya hücre gerilimlerine bağlı olarak dengeleme akımının kontrolü sağlanmıştır. Tasarlanan kullanıcı ve bilgisayar arayüzü sayesinde hücre gerilimleri ve sıcaklıkları anlık olarak takip edilmekte ve eş zamanlı kayıtlar bilgisayar ortamında saklanmaktadır. Böylece batarya hücrelerinde meydana gelebilecek aşırı sıcaklık artışı veya hücrelerden herhangi birinin arızalanması gibi olası sorunlar belirlenerek müdahale edilebilmektedir. Benzer şekilde BMS üzerinde kullanılan çoklayıcı sayesinde pin sayısı bakımından daha küçük mikrodenetleyiciler kullanılarak daha fazla batarya hücresinin kontrol edilebileceği görülmüştür.

Tasarlanan BMS, dengeleme direnci ve MOSFET'in iç direncinin kullanılmasıyla referans gerilime bağlı olarak hücre gerilimlerini dengelediğini ve batarya paketinin güvenli çalışma bölgesi sınırları içerisinde kullanıldığını göstermiştir. BMS üzerinde yapılan tüm testler başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Turksoy, A., Teke A., and Alkaya A. A comprehensive overview of the dc-dc converter-based battery charge balancing methods in electric vehicles, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 133, 110274, (2020).
- [2] Baumhöfer, T., Brühl M., Rothgang, S. and Sauer, D.U. Production caused variation in capacity aging trend and correlation to initial cell performance, **Journal of Power Sources**, 247, 332-338, (2014).
- [3] Kıvrak, S. et al. Battery management system implementation with the passive control method using MOSFET as a load, **Measurement and Control**, 53(1-2), 205-213, (2020).
- [4] Conway, T. A Simple Robust Active BMS for Lithium Ion Battery Stack, **IEEE Transactions on Power Electronics**, doi: 10.1109/TPEL.2020.3024904, (2020).
- [5] Han, W., Zhang L., Han Y. Computationally efficient methods for state of charge approximation and performance measure calculation in series-connected battery equalization systems, **Journal of Power Sources**, 286, 145-158, (2015).
- [6] Morstyn, T. Momayyezhan, M. Hredza B.K. and Agelidis, V.G. Distributed Control for State-of-Charge Balancing Between the Modules of a Reconfigurable Battery Energy Storage System, **IEEE Transactions on Power Electronics**, 31(11), 7986-7995, (2016).
- [7] Zhang, H., Wang Qi, Y.H. and Zhang, J., Active Battery Equalization Method Based on Redundant Battery for Electric Vehicles, **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, 68(8), 7531-7543, (2019).
- [8] Choudhury, S. et al., A Supervisory State of Charge and State of Power Management Control Strategy among Hybrid Energy Storage Systems through Thermal Exchange Optimization Technique, **IEEE Calcutta Conference (CALCON)**, Kolkata, India, pp. 323-327, (2020).
- [9] Vishakha V.V., Jadoun, V.K., Jayalaksmi N.S. and Agarwal, A. Various Methods Used for Battery Balancing in Electric Vehicles: A Comprehensive Review, **International Conference on Power Electronics & IoT Applications in Renewable Energy and its Control (PARC)**, Mathura, Uttar Pradesh, India, pp. 208-213, (2020).
- [10] Zhang, C., Cheng, G., Ju, Q., Zhang, W., Jiang, J. and Zhang L. Study on Battery Pack Consistency Evolutions during Electric Vehicle Operation with Statistical Method, **Energy Procedia**, 105, 3551-3556, (2017).
- [11] Ekici Y. and Tan N. Charge and discharge characteristics of different types of batteries on a hybrid electric vehicle model and selection of suitable battery type for electric vehicles, **International Journal of Automotive Science And Technology**, 3(4), 62-70, (2019).

- [12] Muratoglu Y., and Alkaya A. Unscented Kalman Filter based State of Charge Estimation for the Equalization of Lithium-ion Batteries on Electrical Vehicles. **Engineering Technology & Applied Science Research**, 9(6), 4876-4882, (2019).
- [13] Zhu, F., Liu, G., Tao, C., Wang K. and Jiang, K. Battery management system for Li-ion battery, in **The Journal of Engineering**, 13, 1437-1440, (2017).
- [14] Duan, C. et al. A Solar Power-Assisted Battery Balancing System for Electric Vehicles. **IEEE Transactions on Transportation Electrification**, 4(2), 432-443, (2018).
- [15] Kilic, A., et al. Design of Master and Slave Modules on Battery Management System for Electric Vehicles, **6th International Conference on Advanced Technology & Sciences (ICAT'Riga)**, 1(1), 161-66, (2017).
- [16] Daowd, M., Omar N., Bossche, P.V.D. and Mierlo, J.V. Passive and active battery balancing comparison based on MATLAB simulation, **IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference**, Chicago, IL, pp. 1-7, (2011).
- [17] Amin, K., Ismail, A., Nugroho and Kaleg, S. Passive balancing battery management system using MOSFET internal resistance as balancing resistor, **International Conference on Sustainable Energy Engineering and Application (ICSEEA)**, Jakarta, 151-155, (2017).
- [18] Kokila M., Manimekalai P. and Indragandhi V. Design and development of battery management system (BMS) using hybrid multilevel converter. **International Journal of Ambient Energy** 41(7): 729-737, (2020).
- [19] Frost, D.F. and Howey, D.A. Completely Decentralized Active Balancing Battery Management System, **IEEE Transactions on Power Electronics**, 33(1), 729-738, (2018).
- [20] Affanni, A., Bellini, A., Franceschini, G., Guglielmi, P. And Tassoni, C. Battery choice and management for new-generation electric vehicles, **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, 52(5), 1343-1349, (2005).
- [21] Das, U. K., Shrivastava, P., Tey, K. S., Idna, M. Y., Mekhilef, S., Jamei, E., Mehdi, Seyedmahmoudian, A. S., Advancement of lithium-ion battery cells voltage equalization techniques: A review, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 134, 110227, (2020).



## Early Period Impacts of the Covid-19 Pandemic on Turkish Electricity Profile

 Büşra FİRİK<sup>1</sup> , Erdal IRMAK<sup>2,\*</sup> 
<sup>1</sup> National Load Dispatching Centre, Turkish Electricity Transmission Company, ANKARA

<sup>2</sup> Gazi University Faculty of Technology, Department of Electrical Electronics Engineering, ANKARA

### Graphical/Tabular Abstract

#### Article Info

Research article

Received: 13/12/2020

Revision: 04/12/2020

Accepted: 27/01/2021

#### Highlights

- Covid-19 Pandemic
- Power System Stability
- Supply and Demand

#### Keywords

 Covid-19  
 Pandemic  
 Turkish Electricity Profile  
 Supply and Demand

The measures taken due to Covid-19 such as lockdown restrictions, stopping the activities of some businesses, taking a break to face to face education at all levels and passing through to distance education, arranging shift working and work at home models for the staff employed in both public and private sector had impacts on the electricity generation and consumption profile. Supply-demand rates changed on a daily, weekly, monthly and seasonal basis. Therefore, effects of the Covid-19 pandemic on Turkish electrical energy profile is examined and analyzed in this paper comparatively with recent years.

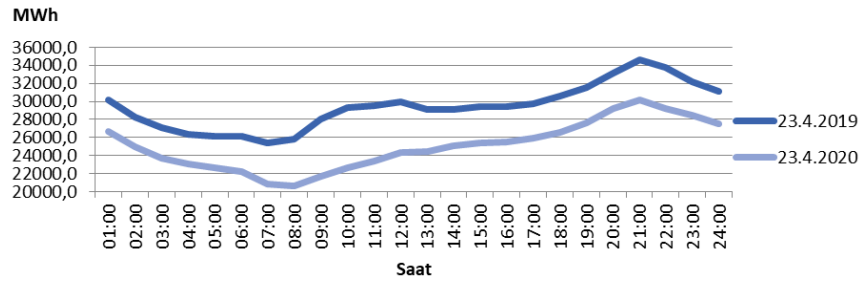


Figure A. Electricity consumption change on April 23, 2019 and April 23, 2020

**Purpose:** The World Health Organization has defined Covid-19, a virus first seen in China in December 2019, as a global epidemic on March 11, 2020 due to its spread and severity. On the same date, the first case was diagnosed in Turkey and then a great success has been achieved in preventing the rise of the epidemic curve thanks to the measures taken timely and accurately. In the study, April 2020 and May 2020, when the epidemic had an evident impact on electricity profile of Turkey, was examined in comparison with previous years. In this context, lockdowns, official and religious days were also examined.

**Theory and Methods:** Effects of the Covid-19 pandemic on Turkish electrical energy profile is examined and analyzed in this paper comparatively with recent years. Some parameters such as lockdown days, public holidays, workdays, Ramadan month and feast, meteorological conditions, annual growth and development rate have been especially considered. The data used in graphics and figures were taken from public platforms on EPIAŞ Transparency Platform and TEİAŞ Load Dispatch Information System.

**Results:** In terms of consumption, it has been observed that electricity consumption has decreased during the weekdays compared to the previous year and consumption hours have also changed. The most serious decrease was experienced in the industrial and commercial group, while residential consumption increased. Furthermore, it was observed that the daily peak hours shifted in regions where industrial consumption was intense. On the other hand, the need for supply decreased because of demand was decreased and thereby, 90% of the total electricity supply of Turkey could be met from national and renewable resources May 24, 2020.

**Conclusion:** This paper focused on April 2020 and May 2020, which are the months when the early effects of the Covid-19 epidemic were heavily observed and plans such as day-ahead consumption forecast were not yet fully predicted. The study will contribute to both the literature and to readers thanks to its detailed technical analyzes and evaluations.





## Early Period Impacts of the Covid-19 Pandemic on Turkish Electricity Profile

Büşra FİRİK<sup>1</sup>, Erdal IRMAK<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Türkiye Elektrik İletim A.Ş. Yük Tevzi Daire Başkanlığı, Çankaya, ANKARA

<sup>2</sup> Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 06500, Yenimahalle, ANKARA

### Abstract

The World Health Organization has defined Covid-19, a virus first seen in China in December 2019, as a global epidemic on March 11, 2020 due to its spread and severity. On the same date, the first case was diagnosed in Turkey and then a great success has been achieved in preventing the rise of the epidemic curve thanks to the measures taken timely and accurately. These measures such as lockdown restrictions, stopping the activities of some businesses, taking a break to face to face education at all levels and passing through to distance education, arranging shift working and work at home models for the staff employed in both public and private sector had impacts on the electricity generation and consumption profile. Supply-demand rates changed on a daily, weekly, monthly and seasonal basis. Therefore, effects of the Covid-19 pandemic on Turkish electrical energy profile is examined and analyzed in this paper comparatively with recent years. Some parameters such as lockdown days, public holidays, workdays, Ramadan month and feast, meteorological conditions, annual growth and development rate have been especially considered. Authors consider that the study will contribute to both the literature and to readers thanks to its detailed technical analyzes and evaluations.

### Makale Bilgisi

Araştırma makalesi  
 Başvuru: 13/12/2020  
 Düzeltilme: 04/01/2021  
 Kabul: 27/01/2021

### Keywords

Covid-19  
 Pandemic  
 Turkish Electricity Profile  
 Supply and Demand

### Anahtar Kelimeler

Covid-19  
 Küresel Salgın  
 Türkiye Elektrik Profili  
 Arz ve Talep

### Covid-19 Salgınının Türkiye Elektrik Profili Üzerindeki Erken Dönem Etkileri

### Öz

Covid-19, ilk olarak Aralık 2019'da Çin'de görülen bir virüs olmakla birlikte yayılımı ve şiddeti nedeniyle 11 Mart 2020'de Dünya Sağlık Örgütü tarafından küresel salgın olarak tanımlanmıştır. Aynı tarihte Türkiye'de de ilk vakanın görülmesiyle alınan yerinde ve zamanında önlemler sayesinde salgın eğrisindeki yükselişin önlenmesinde büyük bir başarı sağlanmıştır. Sokağa çıkma yasakları, bazı işyerlerinin geçici olarak faaliyetlerinin durdurulması, tüm seviyelerde eğitime ara verilmesi ve uzaktan eğitime geçiş, kamuda ve özel sektörde dönüşümlü veya esnek çalışma düzenine geçilmesi gibi tedbirlerin elektrik üretim ve tüketim profilinde de etkileri olmuştur. Günlük, haftalık, aylık ve mevsimlik bazda arz-talep oranları değişmiştir. Bu nedenle bu çalışmada, Covid-19 salgın sürecinin Türkiye elektrik enerjisi profilindeki erken dönem etkileri, önceki yıllarla karşılaştırmalı olarak incelenmiş ve yorumlanmıştır. Sokağa çıkma yasaklarının olduğu günler, resmi tatil günleri, mesai günleri, ramazan ayı ve bayramı, meteorolojik değişimler, yıllık büyüme oranı gibi parametreler özellikle göz önünde bulundurulmuştur. Sunulan bu çalışmanın içerdiği detaylı teknik analizler ve değerlendirmeler ile literatüre katkı sağlayacağı ve okuyuculara faydalı olacağı düşünülmektedir.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Covid-19 virüs salgını 2019 yılında Çin'de ortaya çıkmış olup tüm dünyada yayılım göstermiştir. Salgının tüm ülkelerde görülmesiyle Dünya Sağlık Örgütü tarafından 11 Mart 2020 itibariyle küresel salgın ilan edilmiştir [1]. Böylelikle salgının yayılımını önlemek açısından tüm dünyada ciddi tedbirler alınmıştır. Bu tedbirlerin çalışma düzeni, eğitim, ticaret, turizm gibi sosyal ve ekonomik faaliyetlerde ülkeleri

etkilemesiyle enerji tüketiminde de değişiklikler oluşturmuştur [2, 3]. Birçok ülkede vaka artışını önlemek amacıyla getirilen sokağa çıkma yasakları, alışveriş merkezlerinin kapatılması, kamu kurumlarının ve eğitim kurumlarının kapatılarak uzaktan eğitim ve esnek çalışma modellerine geçilmesi talep tarafında farklılıklar meydana getirerek mesken tipi enerji tüketimlerini artırmıştır. Böylece enerji tüketim alışkanlıklarında değişimler oluşmuş ve sanayi tipi tüketimlerde de düşüşler yaşanmıştır [4].

Salgın döneminde yaşanan elektrik tüketim profilleri birçok ülkede araştırma konusu olmuştur. Örneğin Kanada'nın elektrik enerjisindeki değişimi gözlemlemek için Leach ve ark. tarafından 2016'dan 2020 yılına kadar olan veriler üzerinden bazı şehirler için analizler yapılmıştır. Ay, hafta ve gün bazında bu dört yılın aynı dönemleri, hava durumu da göz önüne alınarak karşılaştırılmıştır. Özellikle Ontario ve Alberta şehirlerine yoğunlaşmış ve üretim tiplerinin yüzdesel değişimleri değerlendirilmiştir. Alberta'da enerji arzında kömürden doğalgaza doğru bir kaynak değişimi gözlenmiştir. Genel olarak enerji talebinde ise %20 civarlarında bir düşüş tespit edilmiştir [5].

Edmarh ve ark., Lagos-Nigeria'da elektrik tüketiminin sokağa çıkma yasağına bağlı değişimini gözlemlemiş ve üç farklı senaryo için 259 fider üzerinde çalışma yapmıştır. İlk senaryo sokağa çıkma yasağının olmadığı bir iş gününde, ikinci senaryo kısmi sokağa çıkma yasağının olduğu günler için ve son senaryo ise tamamen sokağa çıkma yasağı olan günler için oluşturulmuştur. Mesken tipi tüketim miktarı ilk iki senaryoda birbirine yakın olup %43 civarında ve son senaryoda ise %49 artmıştır. Sanayi tipi tüketim ise yine ilk iki senaryoda %24 civarında ve son senaryoda %18 azalmıştır [6].

Ghiani ve ark. tarafından İtalya'da salgından dolayı yük profili, elektrik enerji tüketimi ve market fiyatlarındaki değişimler değerlendirilmiş ve son üç yılda 5 haftalık süreçte yük profilindeki değişimler karşılaştırılmıştır. Aynı dönemin geçen yıllarına göre tüketim miktarı %37 civarında azalma göstermiştir. Enerji sektöründe %30 civarında fiyat düşüşü olmuştur. Enerji tüketim miktarının azalmasına bağlı olarak yenilenebilir üretim kaynağından elde edilen üretim payı %23'ten %40'a ulaşmış ve çevreye zararlı üretim kaynakları azaldığı için CO2 emisyon seviyesinde de düşüş yaşanmıştır [7]. Küresel salgın döneminde toplam tüketim azaldığı için talebin karşılanmasında yenilenebilir enerji kaynaklarının yeterli olabileceği ortaya çıkmış olsa da özellikle güneş enerjisi sektörü gibi bazı enerji sektörlerinde de salgının etkilerinin gözlemlendiği [8] numaralı referansta rapor edilmektedir.

Aruga ve ark., Hindistan'daki doğu, batı, kuzey, güney ve güneydoğu olarak 5 coğrafi bölge için yapılan test sayıları ve vaka durumuna göre enerji tüketim miktarındaki değişimleri karşılaştırmıştır. Kısa ve uzun dönemli etkiler değerlendirilmiştir. Çalışma sonucunda elektrik tüketiminin hane halkı gelir düzeyiyle ilişkili olduğu ortaya çıkarılmıştır. Salgın sürecinin yoksul bölgelerde tüketimlere yansımaları çok ciddi olarak farklılık göstermemiştir. Böylece bölgenin ekonomik durumunun tüketimdeki değişime yansımaları gözlemlenmiştir [9].

Küresel salgın sürecinin enerji piyasası ve profili üzerindeki etkileri üzerine ülkemizde de bazı değerlendirmeler ve çalışmalar sunulmuştur. Örneğin, Türkiye Ekonomi Politikaları Araştırma Vakfı tarafından sunulan bir bültende Türkiye'nin elektrik tüketiminin 13 Nisan 2020 haftasında bir önceki yıla göre yüzde 22 azaldığı kaydedilmiştir [10]. APlus Enerji tarafından sunulan bilgi notunda ise salgın döneminde üretim faaliyetlerinin düşüşü ile pik saatlerdeki talep artışı hızının azaldığı ortaya konulmuştur [11]. Elektrik Üreticileri Derneğinin bir haber bülteninde, salgının hız kazandığı Mayıs 2020'de elektrik tüketiminin geçen yılın aynı ayına göre %16,7 azalarak 19 milyar 640 milyon 23 bin kilovatsaate düştüğü, elektrik üretiminin de %17,8 azalışla 19 milyar 550 milyon 20 bin kilovatsaate gerilediği bildirilmiştir [12].

Gerek yukarıda diğer ülkeler için yapılan çalışmalar ve gerekse de ülkemiz için yapılan değerlendirmeler göz önüne alındığında, küresel salgının hayatın birçok alanında olduğu gibi enerji sektöründe de kayda değer etkileri olduğu açıktır. Bu nedenle bu çalışmada, Covid-19 salgınının Türkiye elektrik enerji sektöründeki yansımaları birçok boyutta ele alınarak tüketim, üretim ve iletim alanlarında yaşanan değişimler ortaya konmuştur. Makalede sadece nicel analiz ve grafiklerle yetinilmemiş aynı zamanda her bir başlık altında detaylı teknik değerlendirmelerde de bulunulmuştur. Çalışmanın ikinci bölümünde öncelikle salgının ülkemizdeki seyir süreci verilmiştir. Üçüncü bölümde, hava durumu ve meteorolojik şartlar kısaca değerlendirildikten sonra salgının etkili olduğu Nisan, Mayıs ve Haziran ayları için günlük, haftalık ve aylık bazda tüketim değişimleri analiz edilmiştir. Dini günler, resmi tatiller ve kısıtlama günlerinde tüketim değişimleri özellikle incelenmiştir. Tüketim analizi sonrasında salgın sürecinde

elektrik iletim şebekesinin işletilmesinde yaşanan değişimler ile enerji üretimi ve arz değişimleri ele alınmıştır.

## 2. TÜRKİYE'DE SALGININ SEYRİ (HISTORICAL PROGRESS OF EPIDEMIC IN TURKEY)

1 Aralık 2019 tarihinde Çin'in Hubei bölgesinin başkenti olan Vuhan'da ortaya çıkan korona virüs salgını Türkiye'de ilk olarak 11 Mart 2020 tarihinde tespit edilmiştir. Bu tarihten itibaren vakaların günlük değişimini gösteren grafik Şekil 1'de verilmiştir. 10 Nisan 2020'de paylaşılan verilere göre 28.000 vaka ile İstanbul en çok vakanın olduğu şehir olurken onu sırasıyla İzmir, Ankara, Kocaeli ve Konya takip etmiştir.

11 Nisan 2020'de Türkiye'de bir günde tespit edilen yeni hasta sayısı 5 bin 138 ile zirveye ulaşmıştır. 19 Nisan 2020'de Türkiye'de bir günde korona virüsten ölen kişi sayısı 127 ile zirveye ulaşmıştır. Bu tarihten itibaren günlük ölüm sayıları azalmaya başlamıştır. 23 Nisan 2020'de ise Türkiye'de aktif hasta sayısı 80 bin 808 ile zirveye ulaşmıştır.



**Şekil 1.** Hasta sayısının günlük bazda değişim grafiği (Nisan-Temmuz 2020)

12 Mart 2020'de okulların tatil edilmesi, kamu görevlilerinin yurtdışına çıkışının izine bağlanması, spor müsabakalarının seyircisiz oynanması gibi kararlar çıkmıştır. Bu kararlarla beraber 16 Mart'tan itibaren tüm seviyelerde eğitime ara verilerek uzaktan eğitime geçiş yapılmıştır. 17 Mart tarihinde başlamak üzere, tiyatro, sinema, lokanta, kahvehane, internet kafe ve kapalı çocuk oyun alanlarının faaliyetlerinin durdurulmasına karar verilmiştir. 20 Mart 2020'de tüm özel hastaneler pandemi hastanesi ilan edilmiştir. Kültürel ve bilimsel etkinlikler ertelenmiştir. İstanbul Büyükşehir Belediyesi, 6 Nisan 2020 Pazartesi gününden itibaren metro seferlerinin 21.30'a kadar yapılması kararını almıştır.

Alınan önlemler kapsamında hafta sonları ve resmi tatillerde 30 büyükşehir ve Zonguldak'ta saat 24.00'e kadar sokağa çıkma yasağı uygulanmıştır. Bu kısıtlamalar şu şekilde sıralanabilir: 11-12 Nisan 2020 (2 Gün), 18 -19 Nisan 2020 ( 2 Gün), 23-24-25-26 Nisan 2020 (4 Gün).

Mayıs ayı içerisinde yeni hasta sayısı azalırken normalleşme hazırlıkları başlamıştır. 3 Mayıs 2020'de Sağlık Bakanlığı, iyileşen hasta sayısının Covid-19 hastalarının sayısını ilk defa geçtiğini açıklamıştır. 11 Mayıs 2020'de alışveriş merkezleri ve kuaförler açılmıştır. 9 ilde sokağa çıkma kısıtlamaları kaldırılmıştır. 29 Mayıs 2020 tarihinde camilerde ibadete belli koşullar altında izin verilmiştir. Bununla birlikte Mayıs ayı içerisinde uygulanan sokağa çıkma kısıtlamaları ise şu şekildedir: 1-2-3 Mayıs 2020 (31 ilde 3 gün), 9-10 Mayıs 2020 (24 ilde hafta sonu 2 gün), 16-17-18-19 Mayıs 2020 (15 ilde 4 gün), 23-24-25-26 Mayıs 2020 (81 ilde Ramazan bayramı boyunca 4 gün), 30-31 Mayıs (2 gün).

Normalleşme süreci 1 Haziran 2020 itibariyle hız kazanmıştır. Şehirlerarası seyahat kısıtlaması kaldırılmıştır. Kamu personeli normal çalışma düzenine geçmiştir. Kreşler ve gündüz bakım evleri açılmıştır. Plajlar, milli parklar ve bahçeler faaliyete geçmiştir. Spor tesisleri 24.00'a kadar hizmet

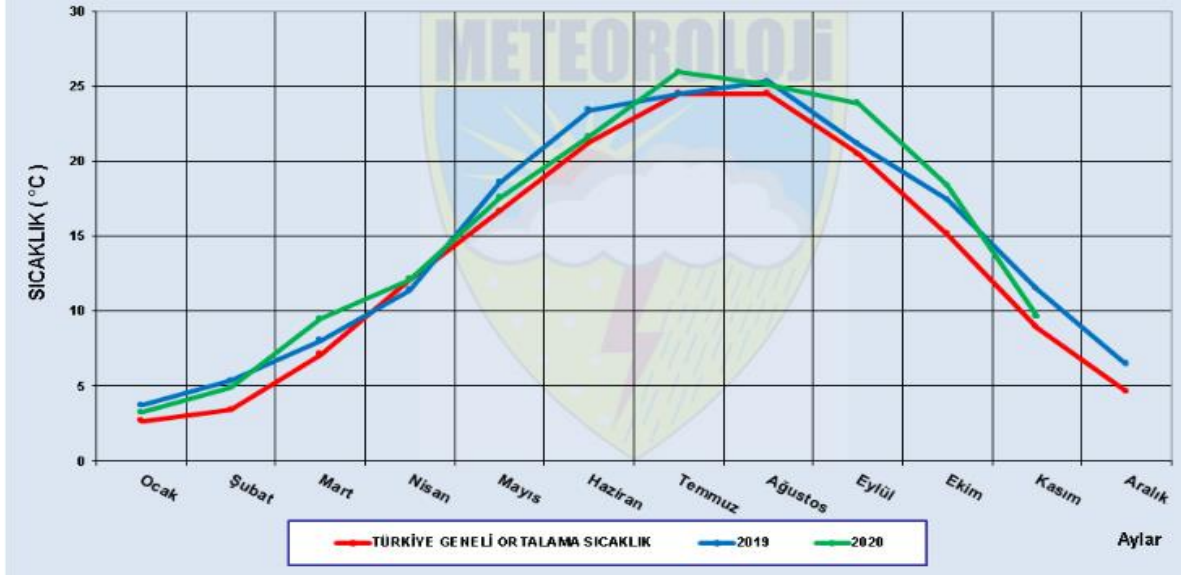
vermeye başlamıştır. Kütüphaneler ve millet kıraathaneleri açılmıştır. Restoran, kafe, pastane, çay bahçesi, yüzme havuzu ve kaplıcalar belirli kurallar altında 22.00'a kadar hizmet vermeye başlamıştır.

### 3. SALGIN SÜRECİNİN TÜRKİYE ELEKTRİK PROFİLİNE ETKİLERİ (EFFECTS OF THE PANDEMIC ON TURKISH ELECTRICITY PROFILE)

Elektrik enerjisinin son kullanım noktasına kadar geçirdiği süreç, birden fazla boyutu içermektedir. En genel haliyle bu boyutlar üretim, iletim, dağıtım ve piyasa süreçleri şeklinde sınıflandırılabilir. Bu nedenle, salgın sürecinin elektrik profiline olan etkilerinin de her bir boyut için ayrı ayrı incelenmesi daha yerinde olacaktır. Bu bölümde, Covid-19 salgınının elektrik profiline olan etkileri sayısal ve grafiksel yöntemlerle analiz edilirken, bahsi geçen boyutlar ayrı başlıklarda ele alınmıştır. Ayrıca dini günler ve resmi tatiller ile sokağa çıkma kısıtlamasının olduğu günlerin de farklı başlıklarda incelenmesi uygun görülmüştür.

#### 3.1. Hava Durumu ve Meteorolojik Şartlar (Weather and Meteorological Conditions)

Elektrik profilinin önceki yıllarla karşılaştırmalı incelenmesinde göz önünde bulundurulması gereken önemli etkilerden birisi hava durumudur. Şekil 2'de, Türkiye genelinde aylık ortalama sıcaklıklar ile 2019 yılı ortalama sıcaklıkları ve 2020 yılı için sıcaklık eğrileri verilmiştir. Görüleceği üzere, 2020 yılı Nisan ayı sıcaklıkları Türkiye Geneli ortalaması ve bir önceki yılın sıcaklık değerleri ile yaklaşık olarak aynı düzeylerde seyretmiştir. Bu nedenle, Nisan ayında elektrik tüketimi üzerinde hava durumunun ciddi bir etkiye sahip olmadığı söylenebilir. Mayıs ayında ise sıcaklığın Türkiye Geneli ortalamasına göre bir miktar yüksek seyrederken 2019 yılının aynı ayına göre daha düşük olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, artış doğrusal bir benzerlik göstermektedir.

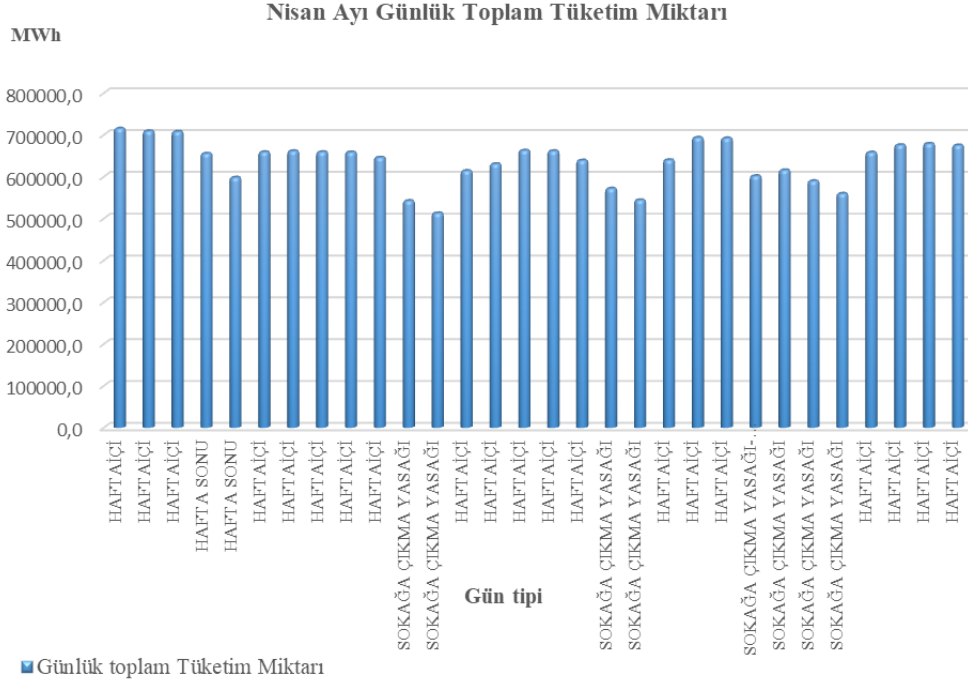


Şekil 2. Türkiye ortalama sıcaklığı ve 2019 yılı ortalama sıcaklığın 2020 sıcaklığına göre durumu [13]

#### 3.2. Günlük, Haftalık ve Aylık Bazda Tüketim Değişimleri (Consumption Changes on Daily, Weekly and Monthly Basis)

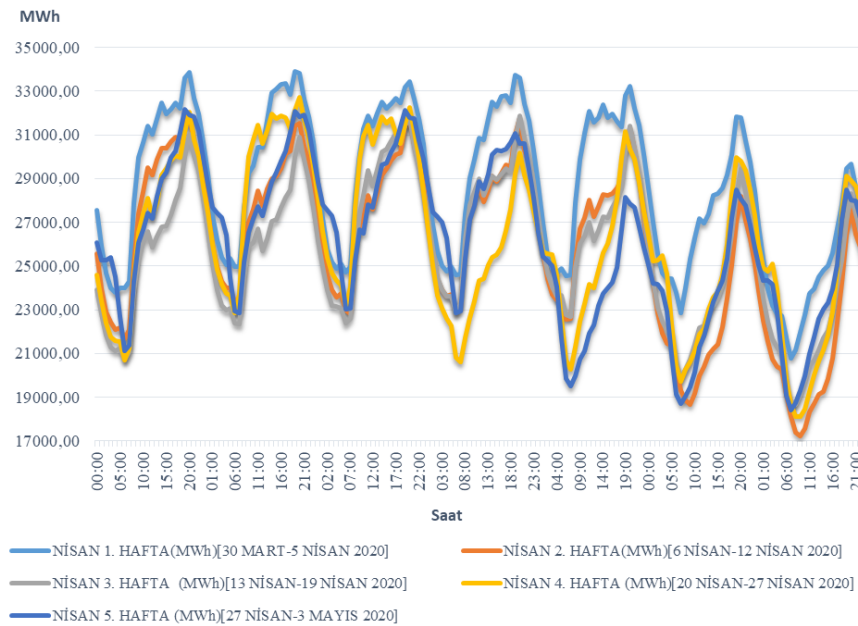
Vakaların yoğunlaşp önlemlerin kademeli olarak artırıldığı ay olması nedeniyle, elektrik tüketimi Nisan ayı içerisinde etkilenmeye başlamıştır. Bu ay boyunca günlük toplam tüketimler, hafta içi-hafta sonu ve sokağa çıkma yasaklarının olduğu günler de göz önüne alınarak Şekil 3'te karşılaştırılmıştır. Sokağa çıkma yasağının olduğu Pazar günlerinde daha belirgin bir düşüş söz konusu iken Cumartesi günleri resmi olarak izinli olan iş gruplarının çalışmasına müsaade edilmesi sebebiyle tüketim daha fazla gözükmektedir. Ayrıca Pazar günleri insanların evde bulunmaları ve AVM benzeri tesislerin hizmet

verememesi, tüketimi daha da düşürmüştür. Ayrıca mesken tipi tüketim artsa da pandemi döneminin olmadığı süreçteki değere ulaşamamıştır. Bu bölümde yer alan grafik ve şekillerin oluşturulmasında kullanılan veriler, EPIAŞ Şeffaflık Platformu ve TEİAŞ Yük Tevzi Bilgi Sistemi üzerindeki halka açık platformlardan alınmıştır.



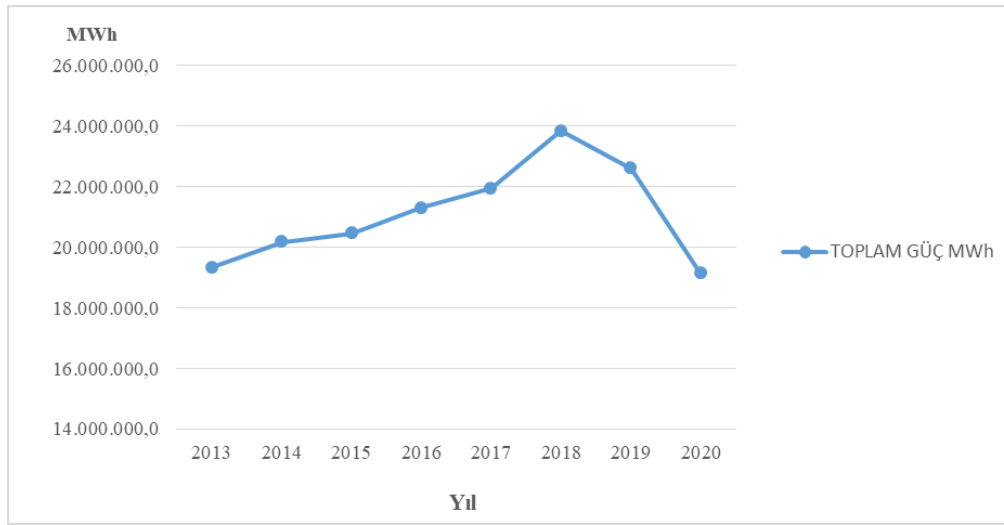
**Şekil 3.** Nisan ayı gün tipine göre günlük toplam elektrik tüketim grafiği

Nisan ayında haftalar arasında tüketimin değişimi, Şekil 4’te verilmiştir. 30 Mart – 5 Nisan arasındaki ilk hafta boyunca tüketimler normal seyrini korumuştur. İlerleyen haftalarda 10 Nisan itibariyle belli dönemlerde sokağa çıkma yasakları getirilmiş ve önlemler artış göstermiştir. Böylece tüketimler de ilerleyen haftalarda ilk haftadaki seviyenin altına düşmüştür. Özellikle 23 Nisan resmi tatili ile hafta sonunun birleştirilmiş olduğu 4. haftadaki 4 günlük kısıtlama süresince tüketim kayda değer seviyede düşmüştür. 1 Mayıs haftasındaki 3 günlük yasaklar da aynı şekilde 5. haftada düşüşe neden olmuştur.



**Şekil 4.** Nisan ayı için Haftalar arası saatlik tüketim değişimleri

2013 yılından itibaren Nisan ayına ait toplam tüketim değerlerindeki değişim durumu Şekil 5'te ve Tablo 1'de verilmiştir. Kış aylarının sona ermesiyle birlikte hava sıcaklığı artışı, tüketimin daha düşük seviyede olmasına neden olmaktadır. Bu şekilde mevsimsel etkinin en belirgin fark gösterdiği dönemler kış ve yaz ayları içerisinde Şubat ve Ağustos aylarıdır. Sıcaklığın artması ile klima ihtiyacı, soğukla beraber ısınma ihtiyacı olması tüketimin artmasına neden olmaktadır. Buna göre değerlendirildiğinde Bahar aylarında sıcaklık değişiminin etkisi daha azdır denilebilir. Türkiye'de elektrik tüketiminin yoğun olduğu dönemler yaz aylarında Ağustos kış ayları için Ocak aylarıdır. Bu aylar için sıcaklık etkisi büyüktür. Nisan ayı sıcaklık değişiminin ise çok ciddi etkilere sebep olmayacağı düşünülebilir. Ancak normal şartlar altında ülkelerin senelik enerji tüketim kapasitesinin büyümesi ve hava durumu koşulları da göz önünde bulundurulduğunda, Tablo 1'de verilen değerlere göre anlamlı bir azalma olduğu anlaşılmaktadır.

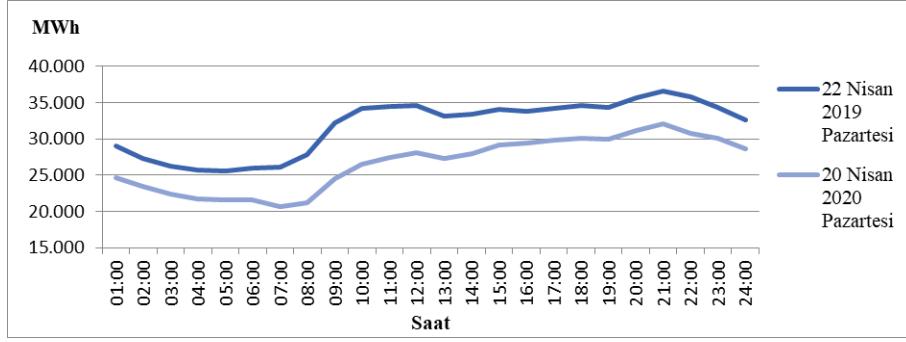


Şekil 5. Yıllara göre Nisan ayı tüketim miktarı değişim grafiği

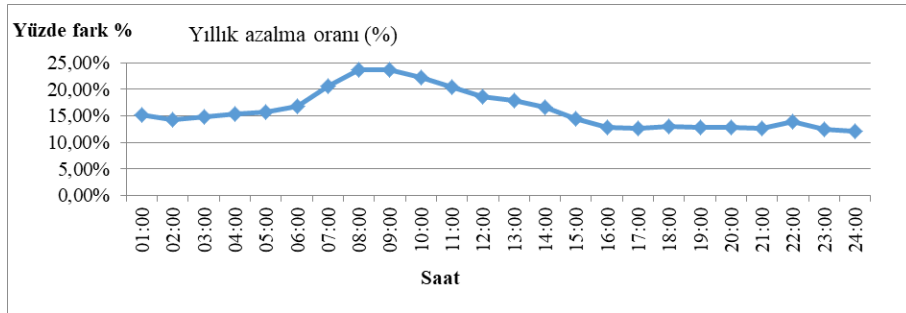
Tablo 1. 2013-2020 yılları arasında Nisan ayına ait toplam değişim yüzdeleri

Yıllar	Yüzde Fark
2013-2014	4,3%
2014-2015	1,4%
2015-2016	4,1%
2016-2017	3,1%
2017-2018	8,6%
2018-2019	-5,5%
2019-2020	-15,4%

Salgın sürecinin hız kazandığı Nisan ayında daha detaylı analiz için, 2019 ve 2020 yıllarında hafta içi aynı tip günler seçilmiş olup tüketimin fazla olduğu bir gün ele alınmıştır. Bu analizin saatlere göre değişim durumu Şekil 6'da ve yüzdelik olarak değişim farkı ise Şekil 7'de verilmiştir. Şekil 7'de gözlendiği üzere tüketimde en büyük fark, saat 08.00-09.00 saatleri için olmuştur. Bu durumun oluşmasının ve tüketim grafiğinin kaymasının nedeni olarak 2020 yılında salgın nedeniyle insanların uzaktan çalışma sistemine geçmiş olması, işletmelerin ve okulların kapalı olması ve toplumun ekseriyetle evde olma durumundan kaynaklı daha geç uyanmaları düşünülebilir. Saatlik değişimler grafikte benzer şekilde gitse de 2020 yılı tüketiminde belirgin bir düşüş söz konusudur.



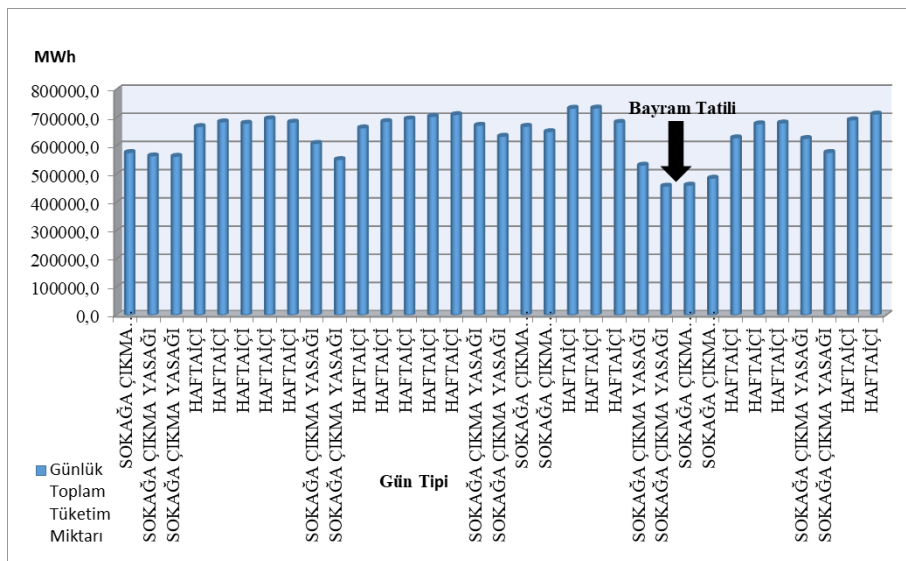
Şekil 6. 20 Nisan 2019 Pazartesi ve 22 Nisan 2020 Pazartesi günleri saatlik tüketim karşılaştırması



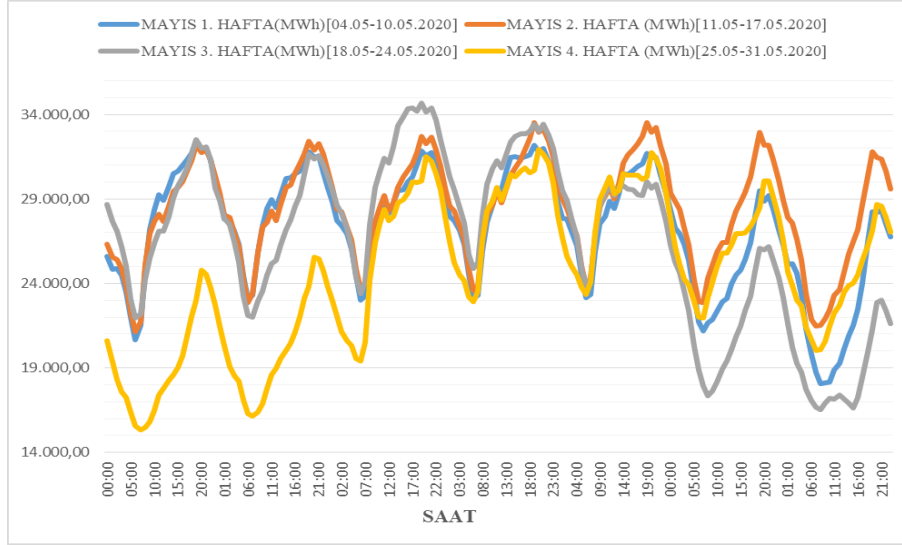
Şekil 7. 20 Nisan 2019 Pazartesi ve 22 Nisan 2020 Pazartesi günü için yüzdelerdeki değişimler

Şekil 8 ve Şekil 9’da görüleceği üzere, Mayıs ayında tüketimler, haftalar arasında benzer ve uyumlu gitmiştir. Sadece resmi tatiller ve hafta sonu sokağa çıkma yasaklarının olduğu günlerde belirgin düşüşler gözlenmiştir. En ciddi düşüş, Ramazan Bayramı haftasında olmuştur. Mayıs ayı için haftalık tüketimlerin saatlere göre değişimi ile Nisan ayı için aynı değişim karşılaştırıldığında, Nisan ayında haftalar arası tüketimde değişimler gözlenirken Mayıs ayında haftalık tüketimler benzerlik göstermiştir.

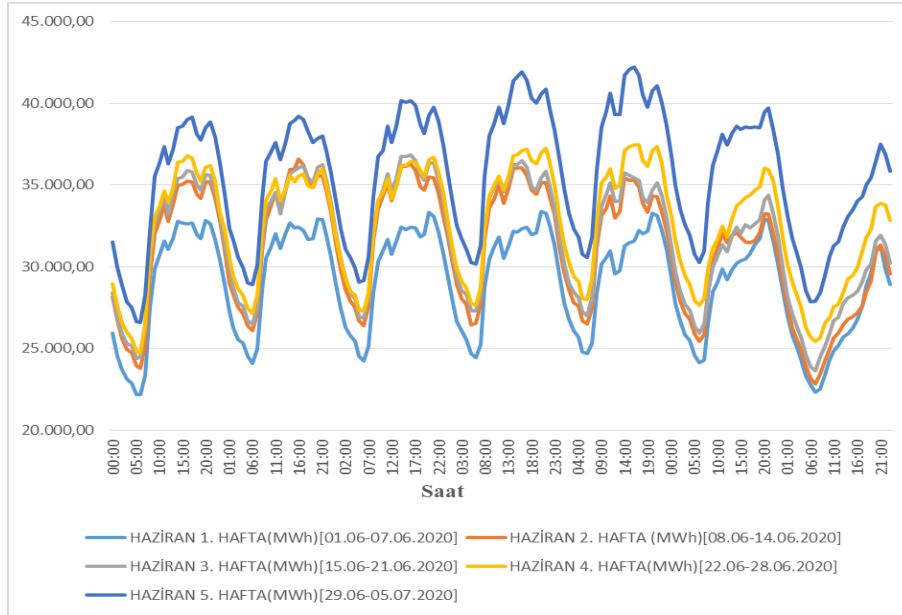
Haziran ayı içerisinde normalleşme sürecine kademeli olarak geçilmesi ile tüketimler saatlik olarak normal seyrine dönmeye başlamıştır. İlk haftalarda tüketimler saatlik çizgilerini korusa da değerler düşüktür. Tüketimler, normalleşme sürecinin hızına bağlı olarak ilerleyen haftalarda artış göstermiştir. Şekil 10’da görüleceği üzere, 5. haftada sıcaklığın da artması ile tüketim normal seyrini yakalamıştır.



Şekil 8. Mayıs ayı günlük toplam tüketim miktarlarında gün tipine göre değişimi



*Şekil 9. Mayıs ayı için haftalar arası saatlik tüketim değişimleri*



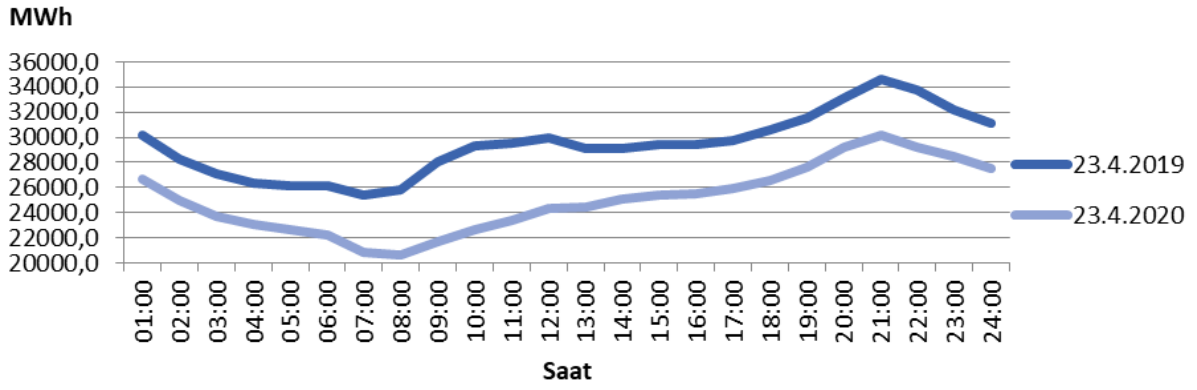
*Şekil 10. Haziran ayı için haftalar arası saatlik tüketim değişimi*

### 3.3. Dini Günler, Resmi Tatiller ve Kısıtlama Günlerinde Tüketim Değişimleri (Consumption Changes on Religious Days, Public Holidays and Lockdown Restrictions)

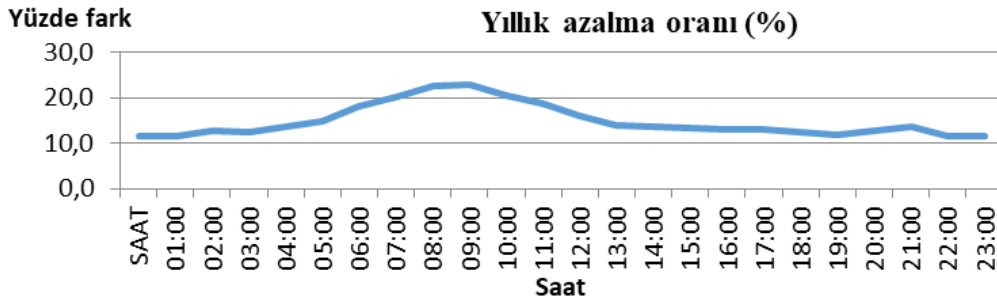
23 Nisan günü ve tatili, 2019 yılında Salı günü iken 2020 yılında Perşembe gününe denk gelmiş olup her ikisi de hafta içi günleridir. Normal şartlar altında hafta içi tüketim profili, yıllar arasında çok ciddi sapmalar göstermez ve saatlik tüketim miktarların da anormal bir durum söz konusu olmadıkça %3-4 civarında fark olabilmektedir. Ancak, Şekil 11’de görüleceği üzere, salgın dönemine denk gelen 23 Nisan 2020 tüketimi ile 2019 yılının aynı gününde gerçekleşen tüketim arasındaki fark %10’un üzerinde olmuştur.

Covid-19 salgını nedeniyle bazı saatlerde farklılık gösterse de genel olarak saat bazında değişimin ilerleme şekli benzerdir. Ancak değerler, tüketim gerçekte beklenen değerlerden düşüktür. Şekil 12’de verilen yüzdelik değişim değerlendirildiğinde, sabah saatlerindeki farkın %20’nin üzerinde olduğu görülmektedir. Bu durum insanların sokağa çıkma yasağı nedeniyle evde kalmaları ve geç saatlerde uyanmaları şeklinde yorumlanabilir.



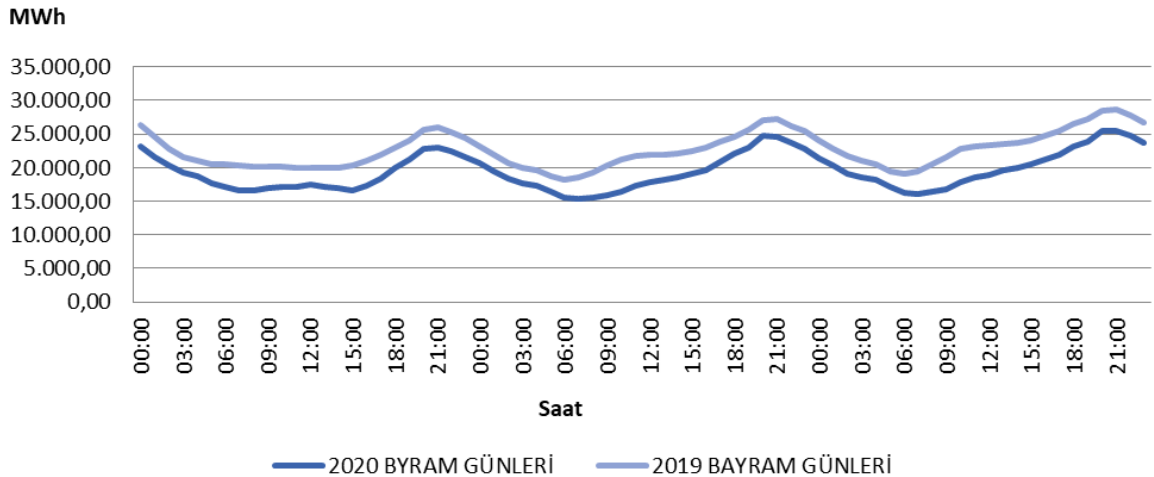


Şekil 11. 23 Nisan 2019 ve 23 Nisan 2020 tarihlerinde elektrik tüketim değişimi

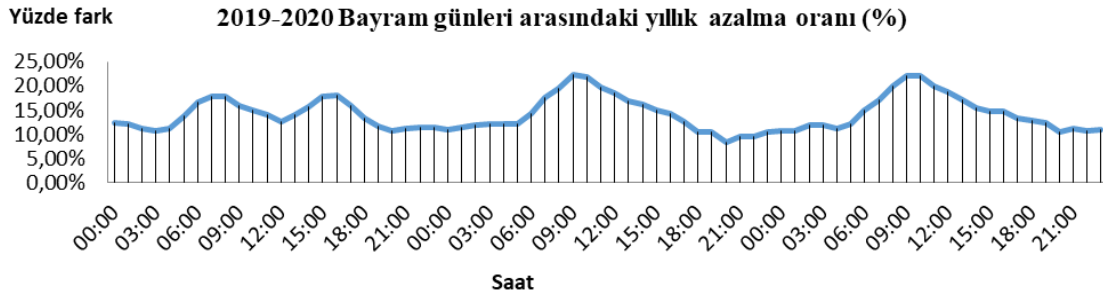


Şekil 12. 23 Nisan 2019 ve 23 Nisan 2020 tarihlerinde saatlik bazda tüketimin yüzdelerik değişimi

Gün öncesinden öngörülmesi açısından zor olan gün tiplerinden biri de bayram günleridir. 2019 yılı verileri ile 2020 verileri karşılaştırıldığında, %8.09 ila %22.11 arası farklar ortaya çıkmış ve Şekil 13'te görüldüğü üzere tüm zaman dilimleri için 2020 verisi daha düşük seyretmiştir. Bu durum fabrikaların çalışmasını durdurması ya da hafifletmesi, şehirlerarası çıkış yasakları ve 81 ilde sokağa çıkma yasağından kaynaklı olarak insanların evlerinde kalması, tatil yerlerinin hizmet verememesi, AVM'ler gibi birçok eğlence merkezlerinin kapalı olmasının bir sonucudur. Şekil 14'te verilen 2019 ve 2020 Ramazan Bayramı günleri (3 gün) için elektrik tüketiminin yüzdelerik değişimi ve 2020 yılındaki azalma oranları da bu durumu doğrulamaktadır. Farkın fazla olduğu saatler bayramın her günü için belirgin bir şekilde sabah saatleridir. Bu durum insanların bayram namazına gidememeleri, aile ziyaretleri olmaması nedeniyle erken uyanmalarının sonucudur.

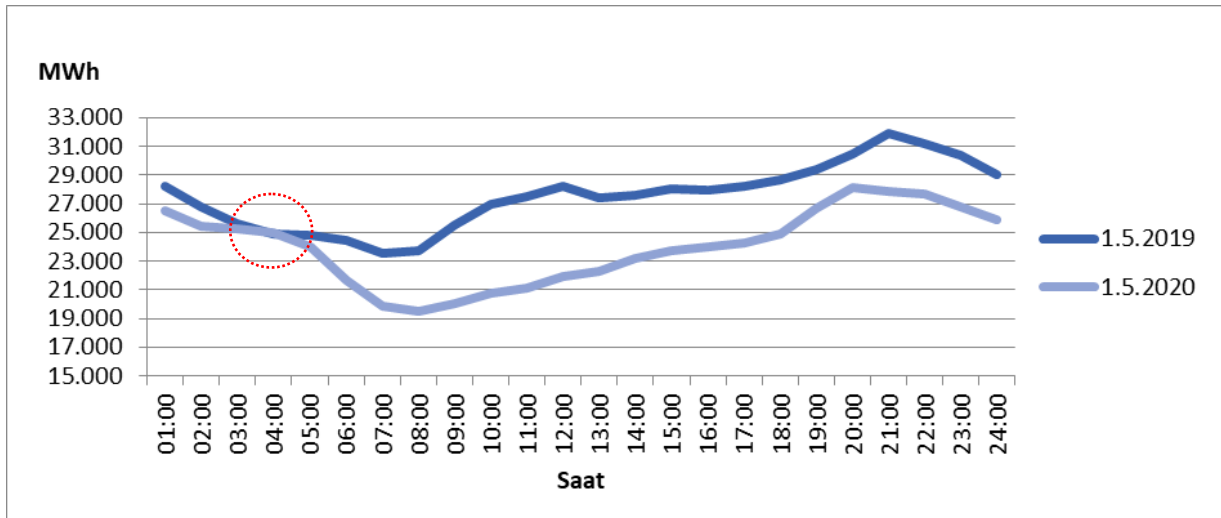


Şekil 13. 2019 ve 2020 Ramazan Bayramı günleri (3 gün) için tüketim verilerinin saatlik değişimi

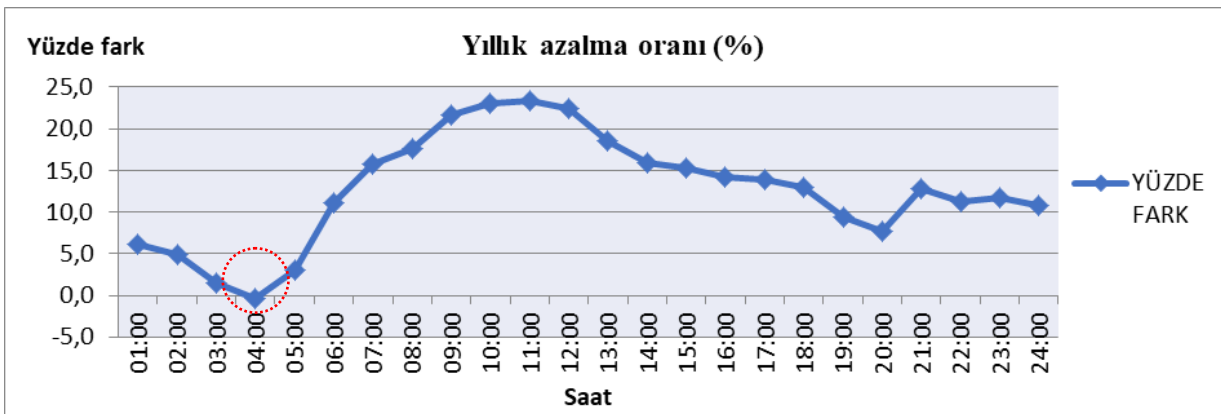


**Şekil 14.** 2019 ve 2020 Ramazan Bayramı günleri (3 gün) için tüketimin yüzdelerik değişimi

Yine resmi tatil günü olan 1 Mayıs tarihi, 2019 yılında Çarşamba gününe denk gelirken 2020 yılında Cuma gününe denk gelmektedir. Her iki günün de hafta içi olması nedeniyle gün tipi benzerdir. Farklı olan durum ise 1 Mayıs tarihinin 2020 yılında aynı zamanda Ramazan ayı içerisinde olmasıdır. Bu durum nedeniyle gece 04.00 saatlerindeki tüketim, 2019 yılı değerine yakındır. Burada tüketimin eşitlenmesini sağlayan unsur, mesken tipi tüketim olup insanların sahur vaktinde uyanmasıdır. Bu durumla ilgili yüzde değişim durumu net bir şekilde Şekil 16'da görülmektedir. Benzer olarak Şekil 15'te görüleceği üzere, iftar saatine yaklaştıkça yük artış göstermiştir. Sonrasında düşüş olsa da normal şartlarda beklenen değerine ulaşamamıştır.

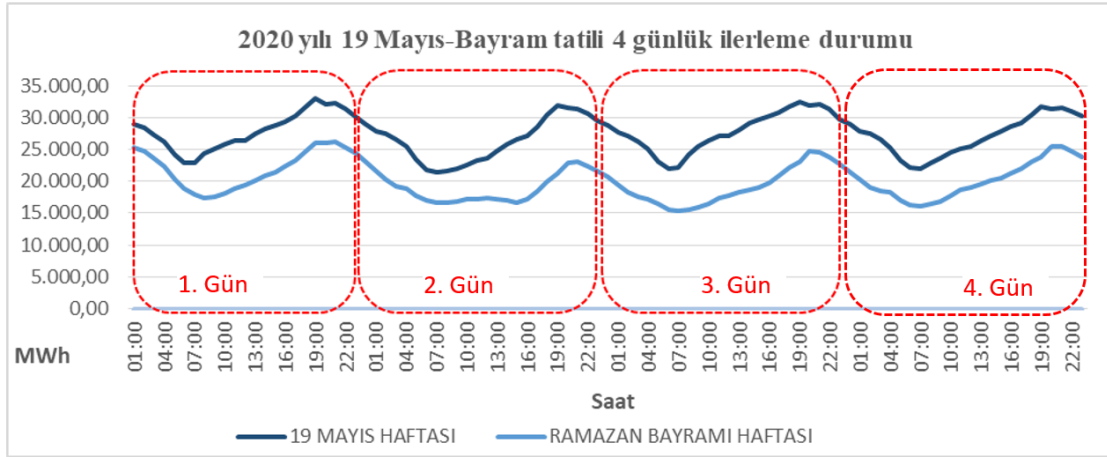


**Şekil 15.** 1 Mayıs 2019 ve 1 Mayıs 2020 günlerinde saatlik elektrik tüketimleri değişimi

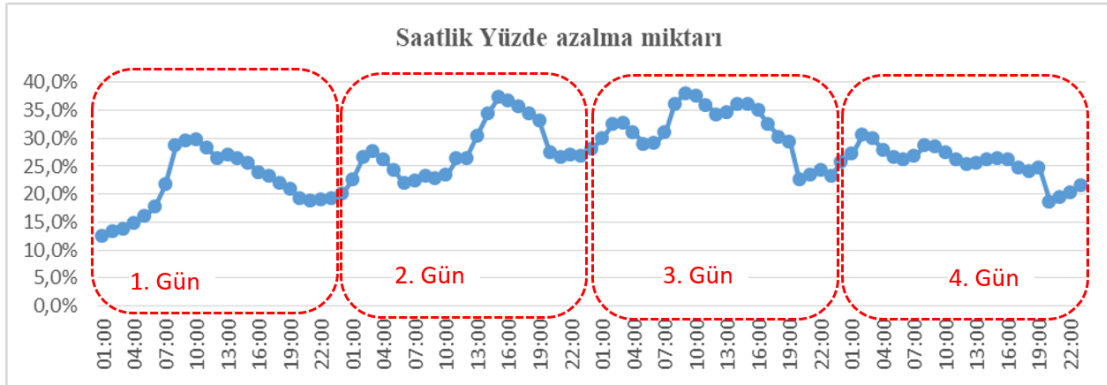


**Şekil 16.** 1 Mayıs 2019 ve 1 Mayıs 2020 tarihlerinde saatlik bazda tüketimin yüzdelerik değişimi

19 Mayıs haftası, tüketim değişiminin görüldüğü önemli haftalardandır. Sokağa çıkma yasaklarının karşılaştırılması açısından, Ramazan Bayramı tatili ile 19 Mayıs haftasının tüketim profilleri Şekil 17’de verilmiştir. Bayram haftasında belirgin seviyede düşük tüketimler olmuştur. Bu durumun oluşmasındaki sebep öncelikle bayramda yasağın 81 il için 19 Mayıs’ta ise 31 il için geçerli olmasıdır. Ayrıca bayramda birçok iş alanında çalışmanın durdurulması da ciddi bir etki oluşturmuştur. Şekil 18’de görüldüğü üzere, %38.1 farkla bayramın üçüncü günü sabah saatlerindeki fark en fazladır. Nedeni ise 19 Mayıs haftasının Pazartesi gününe denk gelmekte olması ve sokağa çıkmanın yasak olmasına rağmen çalışma izni ile birçok işyerinin faal olmasıdır.



Şekil 17. Ramazan Bayramı ve 19 Mayıs haftalarında sokağa çıkma yasağının karşılaştırması



Şekil 18. Ramazan Bayramı ve 19 Mayıs haftasındaki günlük sokağa çıkma yasağı günlerinde tüketim farkının yüzdelik oranı

### 3.4. Tüketici Türüne Göre Tüketim Değişimi (Change of Consumption based on Consumer Type)

Tüketici türüne göre değerlendirildiğinde Nisan ayı içerisinde vakaların en üst seviyeye ulaşması ile beraber sokağa çıkma yasakları sık aralıklarla getirilmiş ve insanlar evde vakit geçirmeye başlamıştır. Tablolar 2 ve 3’de verilen 2019-2020 EPDK aylık sektör raporu bilgilerine göre, mesken ve tarımsal sulama türü tüketimler artarken aydınlatma, sanayi ve ticarethane türü olanlar düşüş göstermiştir. Özellikle en fazla düşüş gösteren tüketim tipi ticarethane grubu olmuştur. Covid-19 salgının yoğunlaştığı süreçte alınan önlemler kapsamında çeşitli mağaza ve işletmeler kapatılmış, açık olsa dahi endişelerden kaynaklı talepler de düşüş yaşanmıştır. Bu duruma bağlı olarak üretime olan ihtiyaç da azalmıştır. Sanayi sektöründe üretimin azalmasına paralel ticaret sektörü de sekteye uğramıştır. Böylece sanayi ve ticaret sektöründe ciddi düşüşler meydana gelmiştir. Evde geçirilen sürenin artmasına bağlı olarak da evlerde elektronik aletlerin kullanımı artmış ve mesken tipi tüketim de artış olmuştur.

**Tablo 2.** 2019 ve 2020 yılları Nisan ayı tüketim türüne göre değişimler

<b>Tüketici Türü</b>	<b>2019 Nisan</b>		<b>2020 Nisan</b>		<b>Değişim (%)</b>
	<i>Miktar (MWh)</i>	<i>Pay(%)</i>	<i>Miktar (MWh)</i>	<i>Pay(%)</i>	
<i>Sanayi</i>	7.960.764,96	43,733	6.159.708,05	39,587	-22,62
<i>Mesken</i>	4.562.882,30	25,067	5.050.217,67	32,456	10,68
<i>Ticarethane</i>	4.994.388,36	27,437	3.447.834,62	22,158	-30,97
<i>Tarımsal Sulama</i>	266.452,64	1,464	499.414,13	3,210	87,43
<i>Aydınlatma</i>	418.424,91	2,299	402.837,40	2,589	-3,73
<b>Genel Toplam</b>	<b>18.202.913,17</b>	<b>100</b>	<b>15.560.011,87</b>	<b>100</b>	<b>-14,52</b>

**Tablo 3.** 2019 ve 2020 yılları Mayıs ayı tüketim türüne göre değişimler

<b>Tüketici Türü</b>	<b>2019 Mayıs</b>		<b>2020 Mayıs</b>		<b>Değişim (%)</b>
	<i>Miktar (MWh)</i>	<i>Pay(%)</i>	<i>Miktar (MWh)</i>	<i>Pay(%)</i>	
<i>Sanayi</i>	8.255.022,94	44,793	6.343.361,15	41,240	-23,16
<i>Mesken</i>	4.447.394,58	24,132	4.620.042,56	30,036	3,88
<i>Ticarethane</i>	4.991.930,53	27,087	3.304.672,22	21,484	-33,80
<i>Tarımsal Sulama</i>	404.551,25	2,195	746.453,96	4,853	84,51
<i>Aydınlatma</i>	330.488,33	1,793	367.193,33	2,387	11,11
<b>Genel Toplam</b>	<b>18.429.387,63</b>	<b>100</b>	<b>15.381.723,21</b>	<b>100</b>	<b>-16,54</b>

### 3.5. Elektrik İletim Şebekesi Üzerine Etkiler (Impacts on Transmission Network)

Elektrik iletim şebekesi incelendiğinde, özellikle sanayi tipi tüketimin yoğun olduğu hatlarda yüklenmeler azalmış olup her bir bölgede tüketim normal değerlerinin altına düşmüştür. Tablolar 4 ve 5'te her bir yük tevzi müdürlüğünün belirli tarihlerde meydana gelen tüketimleri verilmiştir. Tablolarda TEİAŞ'ın veri paylaşım servisi olan YTBS (Yük tevzi Bilgi Sistemi) üzerinden alınmış bilgiler kullanılmıştır. Puant güçler ve saatleri bir önceki yılın aynı dönemindeki aynı gün değerleri ile karşılaştırıldığında, bölgesel puantların önceki yıla göre belirgin şekilde her bir bölge için azaldığı açıkça görülmektedir. Puant saatlerinin ise Trakya YTM için özellikle öğle saatinden 2-3 saat civarı ileriye kaydığı gözlenmiştir.

Sanayinin yoğunlukta olduğu bir bölge olması nedeniyle Trakya bölgesinin tüketimlerindeki ve puant saatindeki kayma dikkat çekicidir. Benzer şekilde diğer bölgelerde de değişimler söz konusudur. Doğu Anadolu YTM ise etkilenmenin en az olduğu bölgedir. Bu bölgede sanayi ve ticarethane tipi yük grubunun az olması nedeniyle puant değer ve saatlerinin bir önceki yıl ile hemen hemen aynı düzeylerde seyrettiği görülmektedir.

**Tablo 4.** 2019 ve 2020 yılları için aynı hafta ve gün ölçeğinde bölgelerin puant durumları

<b>BÖLGE ADI (YTM)</b>	<b>NİSAN AYI 2. HAFTA</b>				<b>NİSAN AYI 3. HAFTA</b>			
	16.04.2019		14.04.2020		24.04.2019		22.04.2020	
	Salı		Salı		Çarşamba		Çarşamba	
	Puant (MW)	Saat	Puant (MW)	Saat	Puant (MW)	Saat	Puant (MW)	Saat
Batı Akdeniz	2.466,91	20:00	2.016,53	20:20	2.515,70	20:50	1.998,46	20:10
Batı Anadolu	5.104,46	20:00	4.189,86	21:00	4.995,73	20:30	4.146,26	21:00
Doğu Akdeniz	3.097,76	20:00	2.513,04	20:30	2.924,07	20:50	2.488,22	19:50
Doğu Anadolu	1.262,00	20:00	1.243,37	20:00	1.338,44	20:00	1.267,29	19:40
Güney Doğu Anadolu	4.797,11	19:30	4.276,46	20:00	4.788,39	20:30	5.115,69	19:40
Kuzey Batı Anadolu	8.193,47	11:00	6.249,63	11:00	7.968,69	11:00	6.771,78	14:00
Orta Anadolu	3.829,10	19:40	3.541,20	20:20	3.884,10	20:10	3.734,13	17:00
Orta Karadeniz	1.930,49	20:00	1.657,80	19:40	1.928,83	20:40	1.793,62	19:50
Trakya	6.086,67	12:00	4.500,41	14:00	5.874,99	11:00	4.743,41	14:00

**Tablo 5.** 2019 ve 2020 yılları için aynı hafta ve gün ölçeğinde bölgelerin puant durumları

<b>BÖLGE ADI (YTM)</b>	<b>NİSAN AYI 4. HAFTA</b>				<b>MAYIS AYI 1. HAFTA</b>			
	30.04.2019		28.04.2020		07.05.2019		05.05.2020	
	Salı		Salı		Salı		Salı	
	Puant (MW)	Saat	Puant (MW)	Saat	Puant (MW)	Saat	Puant (MW)	Saat
Batı Akdeniz	2.465,97	20:10	2.049,81	21:00	2.438,17	20:50	1.970,38	21:00
Batı Anadolu	4.919,55	20:30	4.456,94	21:00	4.902,30	21:00	4.388,93	23:00
Doğu Akdeniz	2.837,75	20:10	2.506,05	23:00	2.688,61	22:00	2.497,31	20:20
Doğu Anadolu	1.291,55	20:00	1.256,25	20:00	1.265,39	20:00	1.251,44	20:00
Güney Doğu Anadolu	4.257,75	20:00	5.206,75	20:10	4.154,30	19:00	4.855,53	19:00
Kuzey Batı Anadolu	7.462,15	11:00	6.303,67	19:30	7.604,00	17:00	6.676,74	14:00
Orta Anadolu	3.756,21	20:10	3.691,49	21:00	3.732,21	21:00	3.416,97	19:30
Orta Karadeniz	1.791,66	20:30	1.686,94	20:30	1.770,01	20:50	1.749,24	19:00
Trakya	5.575,61	11:00	4.325,53	15:00	5.505,92	14:00	4.706,22	15:00

### 3.6. Elektrik Üretimi Üzerine Etkiler (Impacts on Generation)

Türkiye'nin son 4 yıldaki Nisan aylarına ait elektrik üretim profili Tablo 6'da verilmiştir. Görüldüğü üzere toplam üretim içerisinde doğalgazdan üretim payı devamlı düşmektedir. Pandemi sürecinin 2020 yılı Nisan ayı ve Mayıs içerisinde enerji tüketiminde düşümlere sebep olması, talebin büyük bir oranının yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılanabilmesine olanak sağlamıştır. Tablo 7'den de anlaşılacağı üzere, özellikle 24 Mayıs 2020 tarihinde, hem salgın nedeniyle uygulanan 81 ildeki sokağa çıkma yasağı hem de Ramazan bayramının ilk günü olması nedeniyle oldukça düşük olan talebin % 90'ı yerli ve yenilenebilir kaynaklardan elde edilebilmiştir. Bu oran içerisinde ise tamamen yenilenebilir enerji payı %66 olmuştur.

**Tablo 6.** Nisan Ayı için yıllara göre üretim kaynaklarının yüzde payları

<b>Üretim Yolu</b>	<b>2017</b>	<b>2018</b>	<b>2019</b>	<b>2020</b>
HES (Barajlı)	19,00%	17,00%	28,34%	31,2%
HES (Akarsu)	13,00%	10,00%	15,32%	16,5%
Rüzgâr	4,00%	5,00%	6,50%	10,4%
Güneş		3,00%	0,06%	0,2%
Doğal Gaz	33,00%	28,00%	13,96%	7,7%
İthal Kömür	12,00%	16,00%	13,79%	13,8%
Linyit	13,00%	15,00%	15,31%	12,6%
Taş Kömürü	1,00%	1,00%	1,29%	1,0%
Fuel Oil	1,00%	0,00%	0,32%	0,1%
Jeotermal	2,00%	3,00%	3,26%	4,2%
Biyokütle			1,03%	1,7%

**Tablo 7.** 24 Mayıs 2020 tarihli enerji üretiminde yerli ve yenilenebilir kaynak kullanımı

<b>Üretim Şekli</b>	<b>Üretim Yüzdesi</b>
Yerli kömür	%16,50
Rüzgâr	%14,50
Jeotermal	%5,30
Hidrolik	%43,70
Güneş	%7,20
Biyokütle	%2,60
Diğer	%0,20
<b>TOPLAM</b>	<b>%90</b>

#### 4. SONUÇ ve DEĞERLENDİRME (CONCLUSION and EVALUATION)

Bu çalışmada, Aralık 2019'da dünya genelinde görülmeye başlayan Covid-19 salgın sürecinin Türkiye elektrik şebekeleri ile üretim ve tüketimlerine olan erken dönem etkileri üzerinde durulmuştur. Çalışmada özellikle salgın sürecinin ülkemizde yoğun etki gösterdiği Nisan 2020 ve Mayıs 2020 ayları, önceki yıllarla karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Bu bağlamda sokağa çıkma yasakları, resmi ve dini günler de ayrıca incelenmiştir.

Elektrik tüketiminde önemli bir etken olan hava durumu açısından incelendiğinde, gerek Türkiye Genel uzun dönem sıcaklık ortalamaları ve gerekse de bir önceki yılın sıcaklık ortalamaları açısından Nisan 2020'de anlamlı bir değişiklik yaşanmadığı, Mayıs 2020'de ise bir miktar değişimler gözlenmiş olsa da sonuca etki edecek bir sıcaklık değişimi yaşanmadığı anlaşılmaktadır. Kaldı ki sıcaklık farklarının elektrik tüketimi üzerindeki en büyük etkisi, ısınma veya serinleme ihtiyaçlarının belirgin düzeyde arttığı Ocak-Şubat ve Temmuz-Ağustos aylarında yaşanmakta olup salgın süreci ile örtüşmemektedir.

Tüketim açısından bakıldığında, bir önceki yıla oranla hafta içi günlerde elektrik tüketimi düştüğü gibi tüketim saatlerinin de değiştiği gözlenmiştir. Akşam saatlerinde tüketimler aydınlatmaların etkisiyle gündüze göre daha yüksek seyretmiştir. En fazla düşüşler ise hafta içi ve hafta sonu sabah saatlerinde yaşanmıştır. Bu sonucun oluşmasında, eğitim-öğretime ara verilmesi, esnek çalışma saatlerine geçilmesi, birçok kurum ve kuruluş personelinin rutin mesai faaliyetlerini evden yürütmesi gibi salgına yönelik tedbirlerin önemli etkisi olduğu değerlendirilmektedir. Tüketici grubuna göre değerlendirildiğinde en ciddi düşüşün sanayi ve ticarethane grubunda yaşandığı, mesken tüketiminin ise artış gösterdiği gözlenmiştir.

Pandemi süreci, puant saatlerinde kaymalara yol açmıştır. Örneğin Trakya bölgesinde genellikle saat 11.00-12.00 saatleri aralığında oluşan puant gücün, yaklaşık 2-3 saat ileriye kaydığı gözlenmiştir. Ayrıca sanayi ve ticarethane yükünün yoğunlukta olduğu Trakya ve Kuzey Batı Anadolu bölgelerinde 1000 MW'ı aşan tüketim düşüşleri dikkat çekicidir.

Haftalık tüketimlerin kendi aralarındaki değişimlere bakıldığında ise, salgının olmadığı süreçlerde ardışık haftalarda tüketim karakteristiği hemen hemen benzer özellikler gösterirken salgının başladığı ve ilerlediği Nisan ve Mayıs aylarında ise birbirini izleyen haftaların tüketim profillerinin oldukça farklılık gösterdiği ve olağan tüketim profillerine benzerlik göstermediği gözlenmiştir.

23 Nisan ve 1 Mayıs gibi hafta içine denk gelen resmi tatillerde 31 ilde uygulanan sokağa çıkma yasağı ve önceki yıllarda aynı tarihlerde hizmet vermekte olan AVM, restoran, kafe vb. işletmelerin kapalı olması nedeniyle %25'lere varan tüketim düşüşleri yaşanmıştır. Benzer şekilde Ramazan Bayramında da 81 ilde uygulanan sokağa çıkma yasağı nedeniyle bir önceki sene Ramazan Bayramı dönemine göre %20 civarında tüketim düşüşleri yaşanmıştır. Öte yandan düşen talep karşısında arz da doğal olarak düşmüş olup Türkiye tarihinde ilk defa 24 Mayıs 2020 tarihinde toplam elektrik arzının %90'ı yerli ve yenilenebilir kaynaklardan karşılanabildiği görülmüştür.

İletim şebekesi yüklenmeleri açısından değerlendirildiğinde, sanayi tipi tüketimin yoğun olduğu Trakya ve Kuzey Batı Anadolu gibi iletim bölgelerinde günlük puant saatlerinin kaydığı ve bir önceki yıla göre de değerinin düştüğü gözlenmiştir. Ayrıca, iletim şebekesinin ve yan hizmetler piyasasının işleyişini sağlıklı ve etkili bir biçimde anlık olarak yürütmek ve kontrolünü sağlamak bilgi birikimi ve tecrübe gerektirmektedir. Ancak daha önce böyle bir salgın süreci yaşanmadığı için söz konusu işlemlerin etkilerini önceden tahmin edebilmek ve buna göre aksiyonlar geliştirmenin oldukça zor olduğu söylenebilir. Özellikle zaman ve bölge açısından öngörülemeyen talep dalgalanmaları başta frekans kararlılığı olmak üzere birçok kritik denetimi zorlaştırmaktadır.

Haziran ayı ilk haftasından itibaren hem salgının önemli ölçüde kontrol altına alınarak normalleşme sürecinin hız kazanması hem de ısınan hava sıcaklıkları ile birlikte elektrik enerjisi göstergelerinin de hızla normale döndüğü ve önceki yıllara benzer bir seyirde devam ettiği gözlenmiştir. Bununla birlikte sunulan bu makalede, Covid-19 salgın sürecinin erken dönem etkilerinin yoğun olarak gözlemlendiği ve gün öncesi tüketim tahmini gibi planlamaların henüz tam anlamıyla kestirilemediği aylar olan Nisan 2020 ve Mayıs 2020 aylarına odaklanılmıştır. Bu nedenle, sokağa çıkma yasağı olan günlerde nasıl bir enerji profili oluşabileceğine dair tecrübe ve bilgi birikiminin nispeten geliştiği dönemler olan Haziran 2020 ve sonrası için detaylı bir analiz yapılmamıştır. Gelecek çalışmalarda, bu süreçler de dâhil edilerek daha kapsamlı bir inceleme yürütülebilir.

#### **KAYNAKLAR (REFERENCES)**

- [1] H. Şirin and S. Özkan, "COVID-19 Epidemiology: In the World and Turkey," Kulak Burun Boğaz ve Baş Boyun Cerrahisi Derg., vol. 28, no. 2, pp. 6–13, 2020, doi: 10.24179/kbbbc.2020-76607.
- [2] E. A. Cinel, "Covid-19'un Küresel Makroekonomik Etkileri ve Beklentiler," Polit. Ekon. Kuram, vol. 4, no. 1, pp. 124–140, 2020, doi: 10.30586/pek.748538.
- [3] Ö. Açıkgöz, A. Günay, "The Early Impact of the Covid-19 Pandemic on the Global and Turkish Economy," Turkish Journal of Medical Sciences, vol. 50, pp. 520–526, 2020, doi:10.3906/sag-2004-6.

- [4] M. Bulut, "Effects of New Normal Life on Electricity Consumption in Covid-19 Process ," J. Sci. Technol. Eng. Res., vol. 1, no. 1, pp. 4–6, 2020, doi: 10.5281/zenodo.3902885.
- [5] A. Leach, N. Rivers, and B. Shaffer, "Canadian Electricity Markets during the COVID-19 Pandemic:An Initial Assessment," Can. Public Policy, vol. 46, pp. S145–S159, 2020, doi: 10.3138/PPP.2020-060.
- [6] N. Edomah and G. Ndulue, "Energy transition in a lockdown: An analysis of the impact of COVID-19 on changes in electricity demand in Lagos Nigeria," Glob. Transitions, vol. 2, pp. 127–137, 2020, doi: 10.1016/j.glt.2020.07.002.
- [7] E. Ghiani, M. Galici, M. Mureddu, and F. Pilo, "Impact on electricity consumption and market pricing of energy and ancillary services during pandemic of COVID-19 in Italy," Energies, vol. 13, no. 13, 2020, doi: 10.3390/en13133357.
- [8] D. Kaushik, "Impact of COVID 19 Pandemic into Solar Energy Generation Sector," International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology, vol. 7, issue 11, 2020.
- [9] A. Jannat, "Effects of COVID-19 on Indian Energy Consumption," no. April, pp. 1–16, 2020.
- [10] Türkiye Ekonomi Politikaları Araştırma Vakfı, "COVID-19'un Ekonomiye Etkisinin Elektrik Tüketimi ile Takibi," 21 Nisan 2020, internet: [https://www.tepav.org.tr/upload/files/1587444016-COVID\\_19un\\_Ekonomiye\\_Etkisinin\\_Elektrik\\_Tuketimi\\_Ile\\_Takibi\\_210420.pdf](https://www.tepav.org.tr/upload/files/1587444016-COVID_19un_Ekonomiye_Etkisinin_Elektrik_Tuketimi_Ile_Takibi_210420.pdf) Erişim tarihi: 07.12.2020.
- [11] APlus Enerji Bilgi Notu: "COVID-19 Salgınının Türkiye Elektrik Talebi Üzerindeki Etkileri", 12 Nisan 2020, internet: <http://www.guyad.org/Eklenti/200,covid-19-salgininin-tr-elektrik-talebi-uzerindeki-etkil-.pdf?0>, Erişim tarihi: 07.12.2020.
- [12] Elektrik Üreticileri Derneği. "Türkiye'nin Elektrik Tüketimi Mayıs'ta Yüzde 16,7 Azaldı", 3 Haziran 2020, internet: [www.eud.org.tr/2020/06/03/turkiyenin-elektrik-tuketimi-mayista-yuzde-167-azaldi/](http://www.eud.org.tr/2020/06/03/turkiyenin-elektrik-tuketimi-mayista-yuzde-167-azaldi/), Erişim tarihi: 08.12.2020.
- [13] Meteoroloji Genel Müdürlüğü Aylık Sıcaklık Analizi, internet: <https://mgm.gov.tr/veridegerlendirme/sicaklik-analizi.aspx>, Erişim Tarihi; Aralık 8 2020)
- [14] Yük Tevzi Bilgi Sistemi, internet: [https://ytbsbilgi.teias.gov.tr/ytbsbilgi/frm\\_istatistikler.jsf](https://ytbsbilgi.teias.gov.tr/ytbsbilgi/frm_istatistikler.jsf) (Erişim Tarihi: Ağustos 2020)
- [15] EPİAŞ Şeffaflık Platformu, internet: <https://seffalik.epias.com.tr/transparency/tuketim/gercekle-sentuketim/gercek-zamanli-tuketim.xhtml> (Erişim Tarihi: Ağustos 2020).
- [16] EPDK Elektrik Piyasası Aylık Sektör Raporları, internet: <https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/3-0-23/elektrikaylik-sektor-raporlar> (Erişim Tarihi: Ağustos 2020).



## Design of Super-Twisting Algorithm Based Sliding Mode Control for 9-Level Packed E-Cell Inverters

Naki GÜLER<sup>1\*</sup> <sup>1</sup>Gazi University, Technical Science Vocational School, Electrical and Energy Department, 06500, Yenimahalle, ANKARA

### Graphical/Tabular Abstract

#### Article Info

Research article  
 Received:26/12/2020  
 Revision:31/01/2020  
 Accepted:01/02/2021

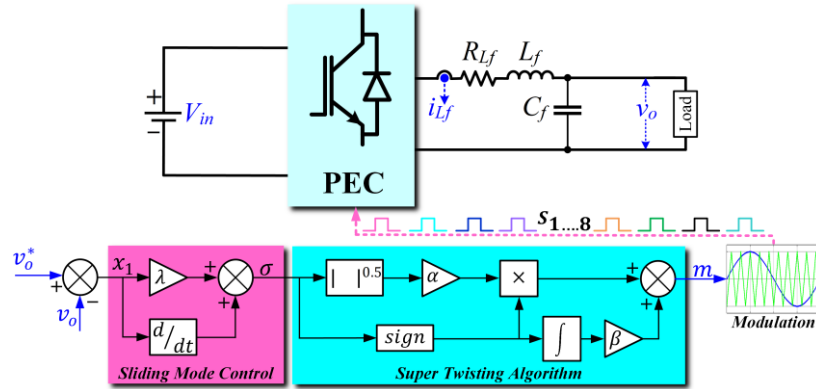
#### Highlights

- PEC Inverter.
- STA-SMC.
- Nine-level inverter

#### Keywords

Sliding mode control  
 Super twisting algorithm  
 Multilevel inverter

This paper presents a Super Twisting Algorithm (STA) based Sliding Mode Control (SMC) method for 9-Level Packed E-Cell (PEC) inverters. Firstly, the mathematical background of the PEC inverter is presented. Then, an objective function was defined for the regulation of inverter output voltage. SMC method is designed using the objective function. Finally, STA and SMC methods are integrated to eliminate the chattering effect. The effectiveness of the control algorithm was investigated by simulation studies.



**Figure A.** Block diagram of the proposed Super Twisting Algorithm based Sliding Mode control method

**Purpose:** The main objective can be defined as the regulation of load voltage in controlling off-grid inverters. In addition to regulation capability, dynamic responses and Total Harmonic Distortions (THD) can be defined as the other performance indicators. Therefore, obtaining a low THD and fast dynamic response can be defined as the other objectives of the proposed controller. In addition, reducing the chattering effect is another purpose of this study.

**Theory and Methods:** Firstly, the theoretical background of 9-Level PEC inverter is presented. To achieve the control objectives, a sliding mode controller is designed. The output of the sliding mode control contains chattering problem which causes variable switching frequency. A super twisting algorithm is designed and integrated with the sliding mode control method to eliminate the chattering effect. A modulation signal was generated by the combined algorithm (STA-SMC) and applied to a modulator for generating the switching signals. Thus, the voltage control of Packed E-Cell inverter was achieved.

**Results:** The effectiveness of the proposed algorithm is investigated by simulation studies using MATLAB/Simulink environments. The steady-state and dynamic response results show that the proposed control strategy successfully regulates the load voltage with low THDs in both cases. In addition, the results show that the proposed control algorithm is capable to control of output voltage under nonlinear load conditions.

**Conclusion:** In this paper, STA-SMC based controller was proposed to regulate the output voltage of stand-alone 9-Level PEC inverters. Simulation studies were carried out to investigate the performance indicators such as THD and dynamic responses. The results show that the proposed control algorithm capable to regulate the inverter voltage with low THD and fast dynamic response under both linear and nonlinear load conditions.



## Design of Super-Twisting Algorithm Based Sliding Mode Control for 9-Level Packed E-Cell Inverters

Naki GÜLER<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Gazi University, Technical Science Vocational School, Electrical and Energy Department, 06500, Yenimahalle, ANKARA

### Abstract

In this paper, a super twisting algorithm based sliding mode control method is presented for 9-Level Packed E-Cell inverters. Regulating the load voltage is the main objective in the control of off-grid inverters. To achieve this objective firstly, a sliding mode controller is designed. The output of the sliding mode method contains chattering which causes variable switching frequency. A super twisting algorithm is designed and integrated with the sliding mode control method to reduce the effect of chattering. A modulation signal is generated by the combined algorithms and it is applied to a modulator for generating the switching signals. Thus, the voltage control of Packed E-Cell inverter is achieved. The performance of the proposed algorithm is investigated by simulation studies. The steady-state and dynamic response results show that the proposed control strategy successfully regulates the load voltage with low total harmonic distortions in both cases.

### Makale Bilgisi

*Araştırma makalesi*  
*Başvuru: 26/12/2020*  
*Düzeltilme: 31/01/2020*  
*Kabul: 01/02/2021*

### Keywords

*Sliding mode control*  
*Super twisting algorithm*  
*Multilevel inverter*

### Anahtar Kelimeler

*Kayan kipli kontrol*  
*Üstün burulma*  
*algoritması*  
*Çok seviyeli evirici*

### 9-Seviyeli Paket E-Hücreli Eviriciler için Üstün Burulma Algoritması Tabanlı Kayan Kipli Kontrol Tasarımı

### Öz

Bu makalede, 9-Seviyeli Paket E-Hücreli eviriciler için üstün burulma algoritması tabanlı kayan kipli kontrol yöntemi sunulmuştur. Şebekeden bağımsız eviricilerin kontrolünde temel amaç, yük gerilimini regüle etmektedir. Bu amaca ulaşmak için öncelikle bir kayan kipli kontrolör tasarlanmıştır. Kayan kipli kontrol yönteminin çıkışı değişken anahtarlama frekansına neden olan çatırtı sorunları içermektedir. Çatırtı etkisini azaltmak için bir üstün burulma algoritması tasarlanmış ve kayan kipli kontrol yöntemine entegre edilmiştir. Tümlleşik algoritmayla bir modülasyon sinyali üretilmiş ve anahtarlama sinyallerini oluşturmak için bir modülatöre uygulanmıştır. Böylece, Paket E-Hücreli eviricinin gerilim kontrolü sağlanmıştır. Önerilen algoritmanın performansı benzetim çalışmalarlarıyla incelenmiştir. Kararlı durum ve dinamik yanıt sonuçları, önerilen kontrol stratejisinin her iki durumda da düşük toplam harmonik bozulmalarla yük voltajını başarılı bir şekilde düzenlediğini göstermektedir.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Güneş panelleri gibi yaygın kullanılan yenilenebilir enerji kaynakları ve depolama birimlerinin doğru gerilim üretmesi, DA/AA dönüşüm sağlayan eviricilerin yaygın kullanımındaki temel faktör olarak belirtilebilir. Klasik iki seviyeli eviriciler basit bir anahtar yapısına sahip olsa da çıkış gerilimindeki bozucu etkilerin fazla olması ve büyük boyutlu filtreler gerektirmesi bir dezavantaj olarak ortaya çıkmaktadır. Harmonik bozulmalar hem güç sistemlerini hem de şebekeden bağımsız çalışan yükleri olumsuz etkilemektedir [1]. Çok seviyeli eviricilerin, düşük toplam harmonik bozulmaya (THB) sahip gerilim üretebilmesi, anahtarlar üzerindeki gerilim stresinin az olması ve düşük anahtarlama frekanslarında çalışabilmesi yaygın kullanılmasına neden olan faktörler olarak sıralanabilir [2]. Eviricilerdeki seviye sayısının artması toplam harmonik bozulmaların azalmasını sağlayan temel unsurdur. Ancak, seviye sayısına bağlı olarak anahtar, diyot ve kondansatör gereksinimleri de

artmaktadır. Bu nedenle, topoloji tasarımlarının büyük kısmı daha az devre elemanı ile maksimum seviyeyi elde etmek üzerine yoğunlaşmıştır.

Çok seviyeli eviriciler temel olarak, kaskat H-köprü [3], uçan kondansatörlü ve nötr kenetlemeli [4] olmak üzere üç ana başlıkta değerlendirilebilir. Kaskat H-köprü evirici, birden çok sayıda klasik iki seviyeli evirici ile oluşturulmaktadır [5]. Bu durum evirici yapısını basitleştirse de çok sayıda izoleli kaynağa ihtiyaç duyması uygulama alanını kısıtlamaktadır. Uçan kondansatörlü eviricide ise bileşen sayısının fazla olması ve kondansatör gerilimlerinin kontrolünün zor olması bir dezavantaj olarak belirtilebilir. Nötr kenetlemeli eviriciler, tek giriş kaynağıyla çalışabilmekte ve uçan kondansatörlü eviriciye göre daha az bileşenle aynı gerilim seviyesi elde edilebilmektedir [2]. Bu nedenle, çok seviyeli eviriciler arasında en yaygın kullanılan model olduğu belirtilebilir. Nötr kenetlemeli eviricilerde DA tarafa eklenen kondansatörlerle ekstra gerilim noktaları oluşturulmaktadır. Böylece, evirici sadece giriş gerilimi seviyesinde değil, eşit seviyedeki kondansatör gerilimleri arasında da anahtarlanabilmektedir. Bu durum seviye sayısını artıran temel unsurdur. Nötr kenetlemeli eviricilerin bu özelliğinden esinlenerek, Paket U-Hücreli (PUH) eviriciler oluşturulmuştur [6]. Bu topolojide ise nötr kenetlemesi yapılmamakta, dolayısıyla dengesiz yüklerin etkileri azaltılmaktadır. Bununla birlikte, PUH topolojiler nötr kenetlemeli eviricilere göre daha az anahtar sayısı ile aynı gerilim seviyelerini oluşturabilmektedir [7]. 5 seviyeli bir PUH eviriciye 2 adet anahtar eklenmesiyle yeni bir topoloji olarak 9-Seviyeli Paket E-Hücreli (PEH) topoloji oluşturulmuştur [8]. PEH evirici 9-Seviyeli diğer topolojilere göre en az devre elemanına sahip yapıdır [9]. PEH topolojisiyle gerilim seviyesi artırılmış, dolayısıyla evirici çıkışındaki THB'ler azaltılmıştır. Bu topoloji de PUH ve nötr kenetlemeli eviricilere benzer olarak DA tarafta 2 adet ek kondansatör barındırmaktadır. Kondansatör gerilimleri giriş gerilimlerinin dörtte biri seviyesinde tutularak toplamda 9 farklı seviyeye sahip gerilim elde edilmektedir. DA tarafta kondansatör bulunduran yapılarda, gerilim dengesinin korunması kontrol işlemlerini zorlaştıran en büyük sorundur [10], [11]. Ancak, PEH topolojisinde doğal dengeleme yapılabilen, dolayısıyla gerilim dengelenmesi için ek bir kontrolör yapısına ihtiyaç duyulmamaktadır [12].

Evirici topolojisi harmoniklerin azaltılmasında önemli bir rol oynasa da, bu durum ancak iyi tasarlanmış bir kontrol algoritmasıyla mümkün olmaktadır. Eviricilerin kontrolünde hedefler çalışma yerine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Şebekeye bağlı bir eviricide akım kontrolü sağlanırken [13], [14], bağımsız çalışan bir eviricide yük geriliminin kontrol edilmesi temel hedeftir [15], [16]. Kontrol işlemleri topolojinin etkinliği üzerinde önemli bir rol oynadığından birçok farklı yöntem ile eviricilerin kontrolü sağlanmıştır. Geleneksel metotlar olarak belirtilebilecek doğrusal kontrol yöntemlerinin yanı sıra, teknolojik gelişmeler doğrusal olmayan kontrol yöntemlerinin uygulanabilirliğini kolaylaştırmıştır. Doğrusal olmayan kontrol yöntemlerinde dinamik tepkilerinin oldukça hızlı olması bu yöntemlerin güç elektroniğinde uygulanmasının temel sebebi olarak belirtilebilir [17]. Model öngörülü kontrol ve kayan kipli kontrol (KKK) popüler yöntemler arasında yer almaktadır. Her iki yöntem de dinamik cevap süresi açısından benzer kabiliyete sahip olsa da KKK yönteminin parametre değişimlerine duyarsız olması oldukça büyük bir avantaj sağlamaktadır [18]. Bununla birlikte bu yöntemler için değişken anahtarlama frekansı uygulanabilirlik için en büyük problemdir [19]. Bu nedenle güncel çalışmalar bu yöntemlerin sabit anahtarlama frekansında çalıştırılması üzerinedir. Model öngörülü kontrolde sabit anahtarlama frekansında çalışma sağlamak için kontrol parametreleri sistemin çalışma noktasına bağlı olarak güncellenmektedir [20]. Ancak bu durum kontrol yapısını karmaşıklaştırmakta ve yüksek performanslı mikrodenetleyici ihtiyacı doğurmaktadır. Kayan kipli kontrolde ise çatırtı sorunu olarak tanımlanan olumsuz etki üzerine birçok çalışma yapılmıştır [16]. Özellikle yüksek dereceli sistemlerde yaygın kullanılan üstün burulma algoritması (ÜBA), kontrolün doğruluğunu artırırken çatırtı etkisini azaltmaktadır [21]. Bu nedenle, kayan kipli kontrol yöntemine entegre edilerek etkili bir kontrol yapısı oluşturulmaktadır.

Bu çalışmada, en az devre elemanı ile 9-Seviyeli gerilim üretebilen PEH topolojisinin çıkış gerilimini kontrol etmek üzere üstün burulma algoritması tabanlı bir kayan kipli kontrol yöntemi geliştirilmiştir. Eviricinin DA bara kondansatörleri arasındaki gerilim seviyesi doğal dengeleme ile eşitlenerek kontrol yapısı basitleştirilmiştir. Önerilen tümleşik algoritmayla, şebekeden bağımsız çalışan PEH eviricinin çıkışına bağlı yük üzerindeki gerilimin kontrolü sağlanmıştır. Oluşturulan kontrol stratejisi, yük ve giriş gerilimindeki değişimlere karşı hızlı dinamik cevaplar üretebilmekte ve sabit anahtarlama frekansında çalışabilmektedir.



Denklem 1, yük geriliminin genliğinin doğrudan  $V_{ab}$  gerilimine bağlı olduğunu açıkça göstermektedir. Denklem 1 kullanılarak, yük gerilimi Denklem 2 ile ifade edilebilir.

$$v_o = V_{ab} - L_f \frac{di_{Lf}}{dt} - i_{Lf} R_{Lf} \quad 2$$

Burada,  $i_{Lf}$  evirici çıkış akımını ifade etmektedir ve Denklem 3 ile elde edilebilir.

$$i_{Lf} = i_{cf} + i_o \quad 3$$

$i_{Lf}$  akımı anahtar durumlarına bağlı olarak, giriş kaynağı,  $C_1$  veya  $C_2$  kondansatörlerinden sağlanmaktadır. Kondansatörler akımları özellikle gerilim dengesi açısından büyük öneme sahiptir. Kararlı durumda çalışan bir 9-Seviyeli PEH eviricide,  $V_{C1}$  ve  $V_{C2}$  gerilimleri giriş geriliminin dörtte birine ( $V_{in}/4$ ) eşit olmalıdır. Bu gereklilik seviyelerin doğrusal artışı açısından önemlidir. Aksi durumda seviye dengesizlikleri oluşacağından çıkış gerilimi üzerindeki harmonik bozulmalar da artacaktır. Kondansatör gerilimlerinin  $V_{in}/4$  seviyesinde tutulması için anahtarlama sinyalleri seçiminde şarj vedeşarj durumları önemlidir. Anahtar durumlarına ve  $i_{Lf}$  akımına bağlı olarak  $i_{C1}$  ve  $i_{C2}$  akımları sırasıyla Denklem 4 ve 5 ile ifade edilebilir.

$$i_{C1} = C_1 \frac{dV_{C1}}{dt} = (a_3 - a_4 - a_5 + a_9 - a_{10} - a_{11})i_{Lf} \quad 4$$

$$i_{C2} = C_2 \frac{dV_{C2}}{dt} = (a_2 + a_3 - a_4 + a_8 + a_9 - a_{10})i_{Lf} \quad 5$$

Denklemlerde  $V_{ab}$  seviyesinin pozitif alternansta ( $a_3$  ve  $a_4$ ) ve negatif alternansta ( $a_9$  ve  $a_{10}$ ) eşit olduğu durumlara dikkat edilecek olursa,  $i_{C1}$  ve  $i_{C2}$  akım yönlerinin terslendiği görülecektir. Bu nedenle, ilgili anahtarlama durumları arasında seçim, kondansatörlerin şarj veyadeşarj durumuna göre yapılmalıdır.  $V_{in}/2$  ve  $-V_{in}/2$  seviyelerinin her birinde 2 olası anahtar durumu bulunmaktadır. İlgili seviyelere ulaşılması için gerekli anahtarlama durumu seçilirken aşağıdaki koşullar dikkate alınmalıdır:

$$a_p \begin{cases} \text{eğer } V_{C1} < (V_{in}/4) \text{ ve } V_{C2} < (V_{in}/4) \text{ ise } p = 3 \\ \text{eğer } V_{C1} > (V_{in}/4) \text{ ve } V_{C2} > (V_{in}/4) \text{ ise } p = 4 \end{cases} \quad 6$$

$$a_n \begin{cases} \text{eğer } V_{C1} < (V_{in}/4) \text{ ve } V_{C2} < (V_{in}/4) \text{ ise } n = 10 \\ \text{eğer } V_{C1} > (V_{in}/4) \text{ ve } V_{C2} > (V_{in}/4) \text{ ise } n = 9 \end{cases} \quad 7$$

Denklem 6 ve 7'de yer alan koşul ifadelerinden açıkça görüldüğü üzere, kondansatör gerilimleri ( $V_{C1}$  ve  $V_{C2}$ )  $V_{in}/4$  değerinden düşükse, Tablo 1'de verilen şarj durumlarına ( $a_3$  ve  $a_{10}$ ) göre anahtarlama sinyalleri seçilerek gerilim seviyelerinin yükseltilmesi sağlanmaktadır. Benzer olarak, kondansatör gerilimleri  $V_{in}/4$  seviyesinden yüksekse, anahtarlama sinyallerideşarj durumlarına ( $a_4$  ve  $a_9$ ) göre seçilerek gerilim seviyesinin azaltılması sağlanmaktadır. Böylece, çok seviyeli eviricilerin kontrolünde büyük bir zorluk olarak ortaya çıkan kondansatörler arası gerilim dengelenmesi, doğal olarak sağlamakta ve kontrol yapısı basitleşmektedir. Diğer seviyelerin oluşturulması için detayları [9]'da verilen çok seviyeli eviricilerin tipik modülasyon şeması doğrultusunda anahtarlama sinyalleri uygulanmaktadır. Bilindiği üzere, modülasyon sinyalinin büyüklüğü, filtre edilmiş evirici geriliminin genliğini belirleyen temel faktördür. Doğrusal bir ifade olarak, eviricilerde yük gerilimi ve modülasyon sinyali arasındaki ilişki Denklem 8'deki gibidir.

$$v_o = mV_{in} \quad 8$$

Burada  $m$ , sinüsoidal dalga formunda ve  $l$  ile  $-l$  aralığında değişen bir modülasyon sinyalidir. Dolayısıyla, yüke uygulanan gerilimin hem genliği hem de dalga biçimi doğrudan  $m$  parametresine bağlıdır. Modülasyon sinyalinin üretilmesi, doğrusal kontrol yöntemleriyle yapılabilmektedir. Ancak doğrusal kontrol yöntemlerinin dinamik cevapları zayıf ve doğrusal olmayan yükler altında harmonikleri bastırmada etkili değildir. Bu nedenle, doğrusal olmayan kontrol yöntemleri daha iyi bir performans sergilemektedir.

### 3. ÜSTÜN BURULMA ALGORİTMASI TABANLI KAYAN KIPLİ KONTROL TASARIMI (DESIGN OF SUPER TWISTING ALGORITHM BASED SLIDING MODE CONTROL)

Kayan kipli kontrol, doğrusal olmayan ve sistem parametrelerine duyarsız bir yöntemdir. Bununla birlikte, kolay uygulanabilir bir yapıya sahiptir ve ani değişimlere karşı oldukça hızlı dinamik cevaplar üretebilmektedir. Bu üstün özellikleri nedeniyle güç dönüştürücülerinin kontrolünde yaygın olarak tercih edilmektedir. Bununla birlikte, çatırtı sorununun değişken anahtarlama frekanslarına yol açması ve sistem verimi üzerinde etkili olması temel uygulama zorluğudur. Ancak, üstün burulma algoritmasıyla (ÜBA) tasarlanan kayan kipli kontrolcüler, sabit anahtarlama frekansında çalışmaya olanak tanıdığından bu olumsuz etkiler ortadan kalkmaktadır. ÜBA algoritması, kayan kipli kontrol yapısının üzerine kurulmaktadır. ÜBA tabanlı kayan kipli kontrolde, sistem kararlılığı için Denklem 9'da verilen ifadenin sağlanması şartı bulunur.

$$\sigma = \dot{\sigma} = 0 \quad 9$$

Burada,  $\sigma$  kayan yüzey fonksiyonudur ve Denklem 10 ile ifade edilir.

$$\sigma = \left( \lambda + \frac{d}{dt} \right)^{n-1} x_1 \quad 10$$

Burada,  $\lambda$  pozitif bir sabit ve  $n$  sistem derecesidir. PEH eviricideki  $C_1$  ve  $C_2$  kondansatör gerilimlerinin dengelenmesi modülasyon şemasında doğal olarak sağlandığından, sistemin derecesi artık sadece çıkış tarafındaki filtre elemanlarına bağlı olmaktadır. Dolayısıyla, 2'inci derecen bir sistemin kontrolü sağlanmalıdır. İkinci dereceden bir sistem için kayan yüzey fonksiyonu Denklem 11 ile ifade edilebilir.

$$\sigma = \lambda x_1 + \dot{x}_1 \quad 11$$

Burada,  $x_1$  ve  $\dot{x}_1$  sırasıyla kontrol girişindeki hatayı ve türevini ifade etmektedir. PEH evirici şebekeden bağımsız çalıştığından, kontrol yönteminin amacı yük gerilimini belirlenen bir referansa regüle etmektedir. Dolayısıyla, kontrol hatası Denklem 12 ile ifade edilebilir.

$$x_1 = v_o^* - v_o \quad 12$$

Burada,  $v_o^*$  yük geriliminin referansını ifade etmektedir ve Denklem 13 ile elde edilmiştir.

$$v_o^* = V_p^* \sin(\omega t) \quad 13$$

Burada,  $V_p^*$  referans tepe değeri ifade etmektedir ve haricen tanımlanan tek giriş parametresidir. Hata fonksiyonu Denklem 12'de belirlendiğinden, artık  $\dot{x}_1$  ifadesi Denklem 14'teki gibi yazılabilir.

$$\dot{x}_1 = \frac{dv_o^*}{dt} - \frac{dv_o}{dt} \quad 14$$

Referans yük gerilimi bir sinüs fonksiyonudur, dolayısıyla türevi sistem parametreleri veya ölçülen değerlere bağlı değildir. Bu nedenle, Denklem 14'ün türevi geri-Euler metodu uygulanarak Denklem 15'teki gibi elde edilebilir.

$$\frac{dv_o^*(k)}{dt} = \frac{v_o^*(k) - v_o^*(k-1)}{T_s} \quad 15$$

Burada,  $T_s$  örnekleme süresini,  $k$  mevcut örnekleme anımı,  $k-1$  ise bir önceki örnekleme anımı ifade etmektedir. Yük gerilimi, ölçülen sistem değişkenlerine bağlı olarak Denklem 2'de verilmişti. Şekil 1 göz önünde bulundurularak,  $C_f$  kondansatörü üzerindeki gerilimin  $v_o$  gerilimine eşit olduğu söylenebilir. Dolayısıyla, çıkış geriliminin türevi, Denklem 16'daki gibi  $i_{cf}$  akımının bir fonksiyonu olarak yazılabilir.

$$C_f \frac{dv_o}{dt} = i_{cf} \quad 16$$

Denklem 3'teki  $i_{cf}$  akımıyla, Denklem 16'daki türevsel ifade yer değiştirilirse, Denklem 17 elde edilir.

$$i_{Lf} = C_f \frac{dv_o}{dt} + i_o \quad 17$$

Sonuç olarak, yük geriliminin türevi Denklem 18'deki gibi elde edilir.

$$\frac{dv_o}{dt} = \frac{1}{C_f} (i_{Lf} - i_o) \quad 18$$

Denklem 11'deki değişkenler yerine konularak, Denklem 19'daki kayan yüzey fonksiyonu elde edilmiştir.

$$\sigma = \lambda(v_o^* - v_o) + \left[ \left( \frac{v_o^*(k) - v_o^*(k-1)}{T_s} \right) - \frac{1}{C_f} (i_{Lf} - i_o) \right] \quad 19$$

Böylece, klasik kayan kipli kontrol tasarımı tamamlanmıştır. Bu aşamadan sonra üstün burulma algoritmasının entegrasyonu yapılabilir. ÜBA algoritmasının temel eşitliği Denklem 20'de verilmiştir.

$$m = \alpha |\sigma|^{0.5} \text{sign}(\sigma) - \beta \int \text{sign}(\sigma) dt \quad 20$$

Daha önce belirtildiği gibi  $m$  modülasyon sinyali ve evirici anahtarlama sinyallerinin üretilmesinde kullanılan tek kontrol çıkışıdır. Ancak, Denklem 20'deki ÜBA yapısının uygulanabilirliğinin teorik olarak incelenmesi gerekmektedir. Çünkü üstün burulma algoritmasının uygulanabilir olması için sistemin bağlı derecesinin bir olması gerekmektedir. Bağlı derecenin belirlenmesi için, kontrol çıkışı ( $m$ ) görünür oluncaya kadar  $\sigma$  fonksiyonunun türevi alınır. Alınan türev sayısı bağlı dereceyi belirler. Dolayısıyla, Denklem 19'daki kayan yüzey fonksiyonunun bir defa türevi alındığında  $m$  değişkeninin dâhil olması bir gerekliliktir. Denklem 19'un türevi Denklem 21'deki gibi yazılabilir.

$$\dot{\sigma} = \lambda(\dot{v}_o^* - \dot{v}_o) + \left[ \dot{v}_o^* - \frac{1}{C_f} \left( \frac{di_{Lf}}{dt} - \frac{di_o}{dt} \right) \right] \quad 21$$

Denkleminde yer alan  $di_{Lf}/dt$  ifadesi  $v_o$  değişkenine bağlıdır ve Denklem 2 kullanılarak Denklem 22'deki gibi ifade edilebilir.

$$\frac{di_{Lf}}{dt} = \frac{1}{L_f} (V_{ab} - v_o - i_{Lf} R_{Lf}) \quad 22$$

Denklem 22'deki  $v_o$  yerine, Denklem 8 yerleştirilirse, Denklem 23 elde edilir.

$$\frac{di_{Lf}}{dt} = \frac{1}{L_f} (V_{ab} - mV_{in} - i_{Lf} R_{Lf}) \quad 23$$

Son olarak, Denklem 23, Denklem 21'de yerine konulursa, Denklem 24 elde edilir.

$$\dot{\sigma} = \lambda(\dot{v}_o^* - \dot{v}_o) + \left[ \dot{v}_o^* - \frac{1}{C_f} \left( \frac{1}{L_f} (V_{ab} - mV_{in} - i_{Lf} R_{Lf}) - \frac{di_o}{dt} \right) \right] \quad 24$$

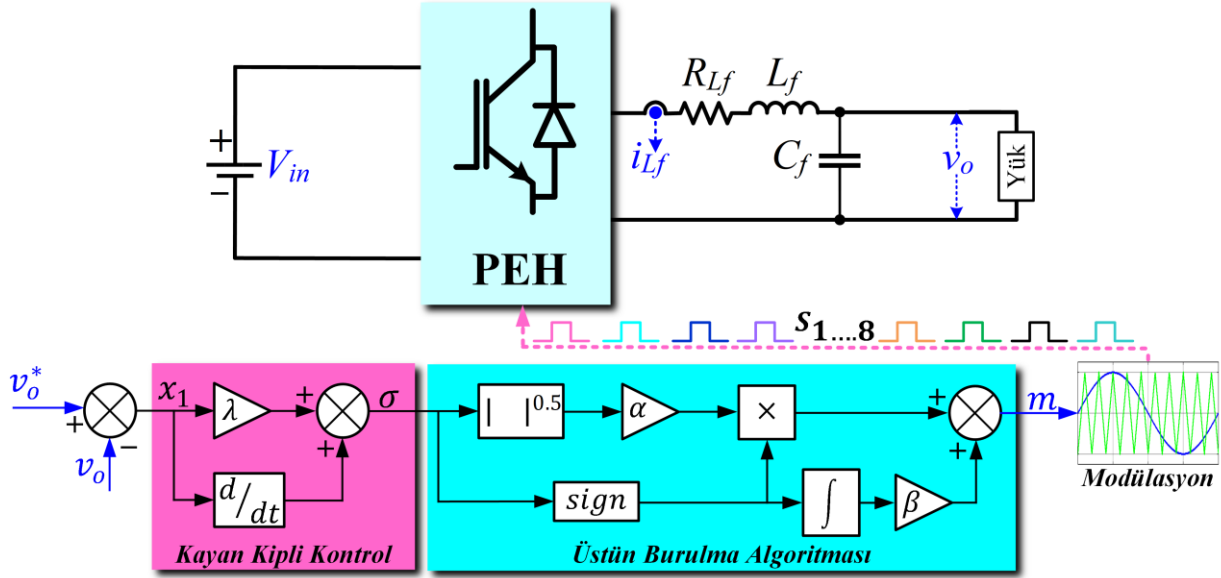
Denklem 21-24,  $\sigma$  fonksiyonunun bir kez türevi alındığında, kontrol çıkışı olan  $m$  parametresinin denkleme dâhil olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla, bağlı derece birdir. Sonuç olarak ÜBA algoritmasının, PEH eviricinin kontrolünde kullanılabilir olduğu ispatlanmıştır.

#### 4. BENZETİM ÇALIŞMALARI (SIMULATION STUDIES)

Önerilen kontrol algoritmasının gerilim regülasyon kabiliyeti ve dinamik cevabının incelenmesi için MATLAB/Simulink ortamında benzetim çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Benzetimi yapılan modelin blok şeması Şekil 2'de, benzetim parametreleri ise Tablo 2'de verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere, kontrol girişi yük gerilimi ile referansı arasındaki hata iken, kontrol çıkışı modülasyon sinyali. Kayan kipli kontroldeki  $\lambda$  ve ÜBA algoritmasındaki  $\alpha$  kazançları dinamik cevap süresi açısından önemli iken,  $\beta$  parametresi kalıcı durum hatası üzerinde etkilidir [21]. Bu bilgiler doğrultusunda, algoritmanın dinamik cevap süresi ve kalıcı durum hatası göz önünde bulundurularak Tablo 2'de verilen kazanç seçimleri yapılmıştır. Kayan kipli kontrol ve üstün burulma algoritması kullanılarak elde edilen  $m$  sinyali, modülasyon işlemine tabi tutularak anahtarlama sinyalleri üretilmiştir.

Şekil 3, doğrusal yük altında  $v_o$ , yük akımı ( $i_o$ ),  $V_{ab}$ ,  $V_{C1}$  ve  $V_{C2}$  gerilimlerinin kararlı durum sonuçlarını göstermektedir. Şekilden görüldüğü üzere,  $V_{ab}$  gerilimi  $+V_{in}$  (320V) ile  $-V_{in}$  arasında olmak üzere 9 farklı seviyeye sahiptir. Filtre sonrasında yüke uygulanan gerilimin ( $v_o$ ) genliği istenilen referans değerindedir ( $220\sqrt{2}V$ ). Ayrıca,  $C_1$  ve  $C_2$  kondansatörlerinin gerilimleri ( $V_{C1}$  ve  $V_{C2}$ ), sabit bir dalgalanmayla giriş gerilimin dörtte biri seviyesindedir. Bu durum, Denklem 6 ve 7'de açıklanan gerilim dengesi sağlama işleminin başarılı bir şekilde gerçekleştiğini göstermektedir. Gerilim regülasyonunun yanı sıra, harmonik

bileşenlerin büyüklükleri de önemli bir faktördür. Şekil 4(a)'da verilen harmonik bozulma sonucundan görüldüğü üzere, çıkış gerilimi üzerindeki harmonik bozulma %1.06 gibi oldukça düşük seviyededir.



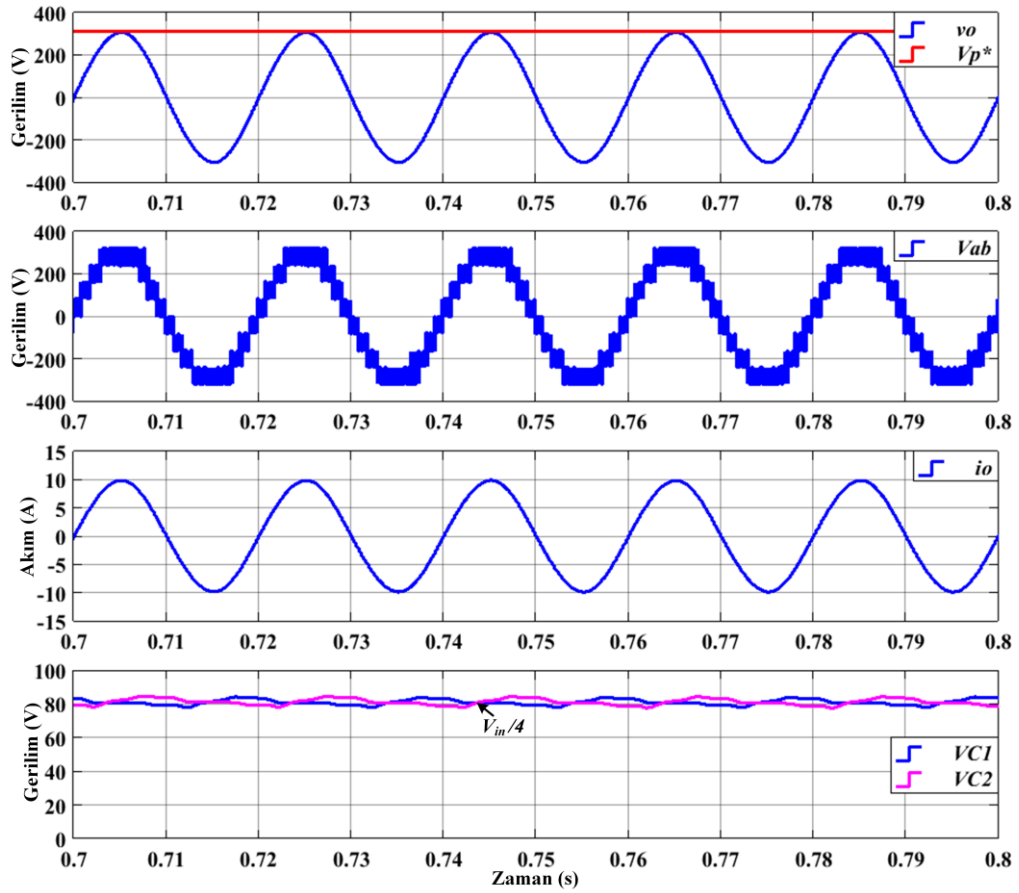
Şekil 2. Üstün burulma algoritmali kayan kipli kontrol yöntemine ait blok şema

Tablo 2. Benzetim parametreleri

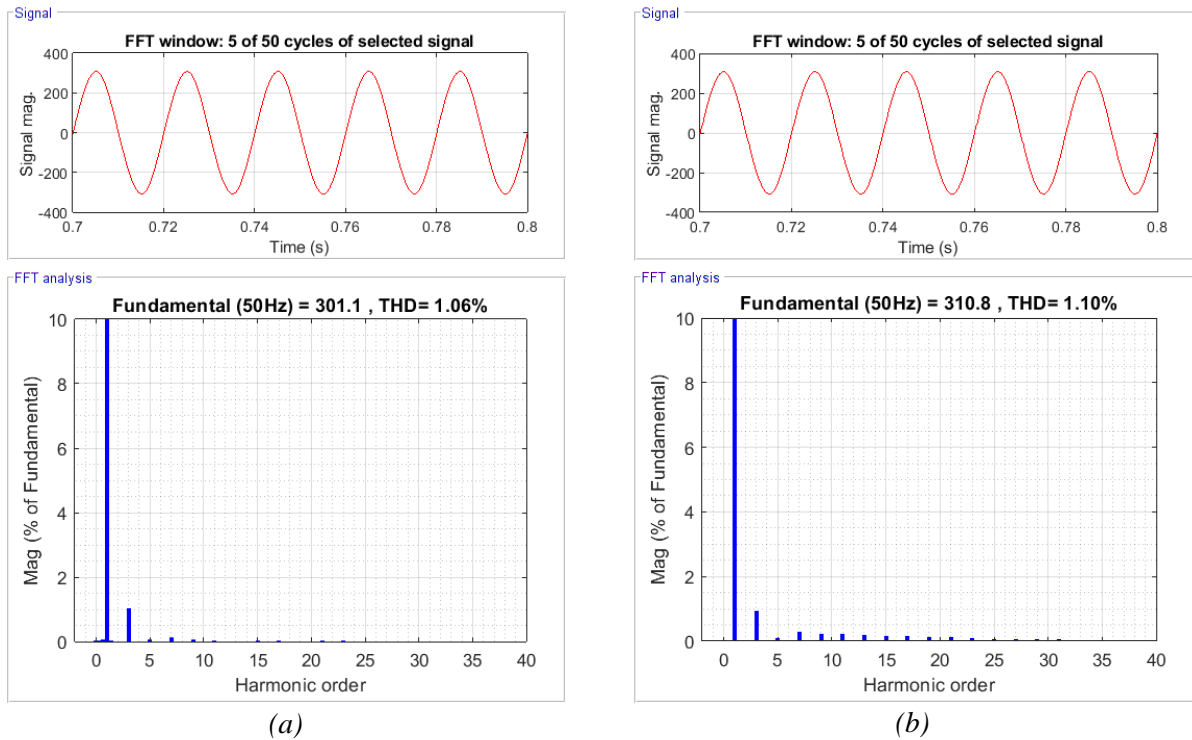
Değişkenler ve Sembolü	Değeri
Referans genlik, $V_p^*$	$220\sqrt{2}V$
Giriş gerilimi, $V_{in}$	320V
Nominal güç, $P_n$	1.5kW
Filtre bobini ve iç direnci, $L_f, R_{L_f}$	5mH, 0.1Ω
Filtre kondansatörü, $C_f$	20μF
PEH kondansatörleri, $C_1, C_2$	3300μF
Örnekleme süresi, $T_s$	10μs
Kontrol kazançları, $\lambda, \alpha, \beta$	5000, 0.0018, 200

Doğrusal yüklerin çektiği akımlar, gerilim dalga biçimiyle aynı olduğundan, ek harmonikler içermezler ve bu durumdaki harmonikler filtre seçiminin uygunluğunu gösterir. Ancak, doğrusal olmayan yükler genellikle yüksek bozunumlara sahip akımlar çektiğinden, şebekeden bağımsız çalışan eviricinin çıkış gerilimi üzerinde de bozucu etkiler oluşturmaktadır [22]. Bu nedenle, kontrol algoritmasının kabiliyeti doğrusal olmayan yükler altında da test edilerek harmonik bileşenler incelenmiştir. Doğrusal olmayan bir yük oluşturmak için, bir fazlı tam köprü doğrultucu çıkışına bir filtre kondansatörü ve omik yük bağlanmıştır. Şekil 5'te doğrusal olmayan yük altında  $v_o$ , yük akımı ( $i_o$ ),  $V_{ab}$ ,  $V_{C1}$  ve  $V_{C2}$  gerilimlerinin kararlı durum sonuçları, Şekil 4(b)'de ise bu durumdaki harmonik sonuçları verilmiştir. Yük akımı ( $i_o$ ) sonucundan görüldüğü üzere, doğrusal olmayan yük eviriciden sinüsoidal olmayan bir akım çekmektedir. Yük akımındaki harmonik bozulma %14.5'tir. Bu durumda, yük geriliminin sinüsoidal dalga yapısında olduğu ve referansına regüle edildiği açıkça görülmektedir. Ayrıca, Şekil 4(b)'deki sonuç, yük gerilimi üzerindeki toplam harmoniklerin %1.10 gibi düşük bir değerde olduğunu göstermektedir. Şekil 3 ve Şekil 5'teki kararlı durum sonuçlarından, hem doğrusal hem de doğrusal olmayan yüklerde gerilim regülasyonunun düşük bir harmonikle sağlandığı söylenebilir.

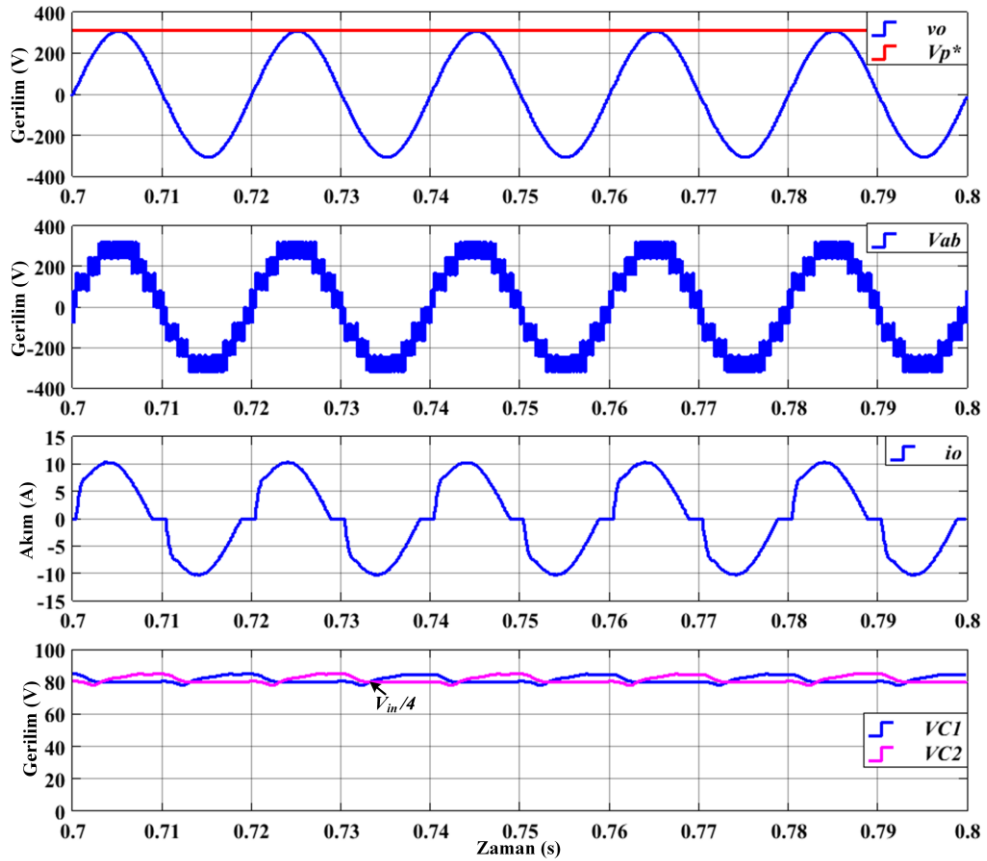




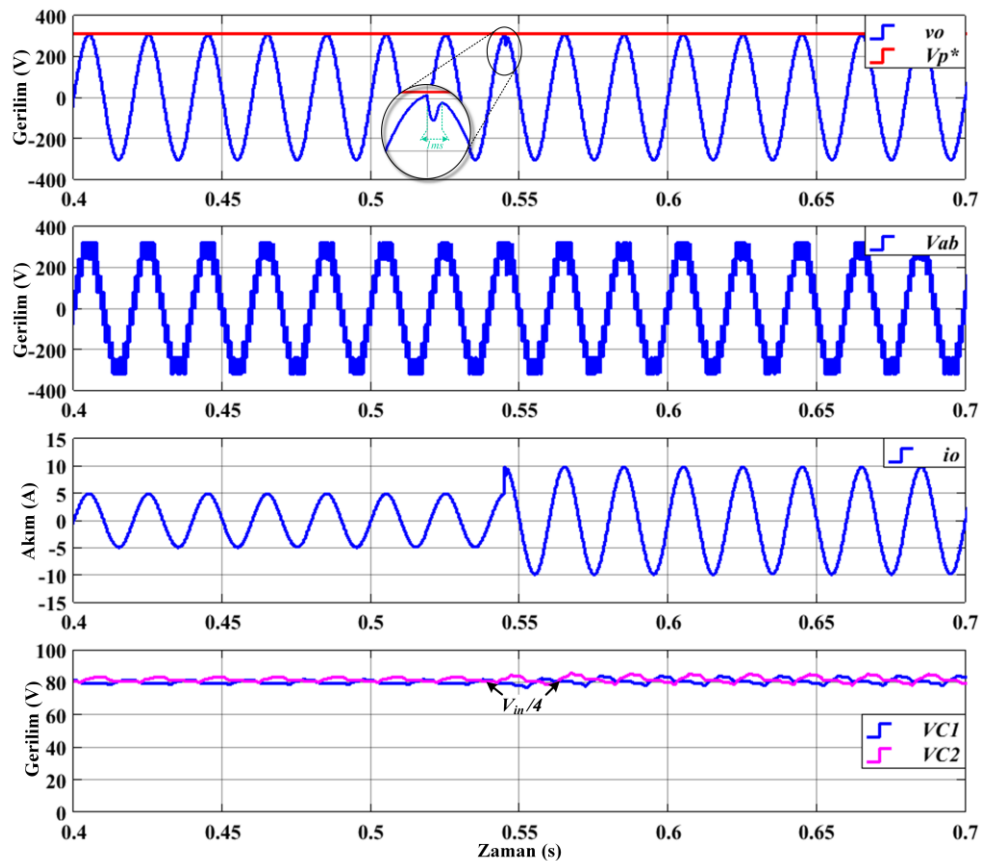
Şekil 3. Doğrusal yük altında,  $v_o$ ,  $V_{ab}$ ,  $i_o$ ,  $V_{C1}$  ve  $V_{C2}$  gerilimlerinin kararlı durum sonuçları



Şekil 4. Yük geriliminin harmonik bozulma sonuçları, a: doğrusal yük altında, b: doğrusal olmayan yük altında

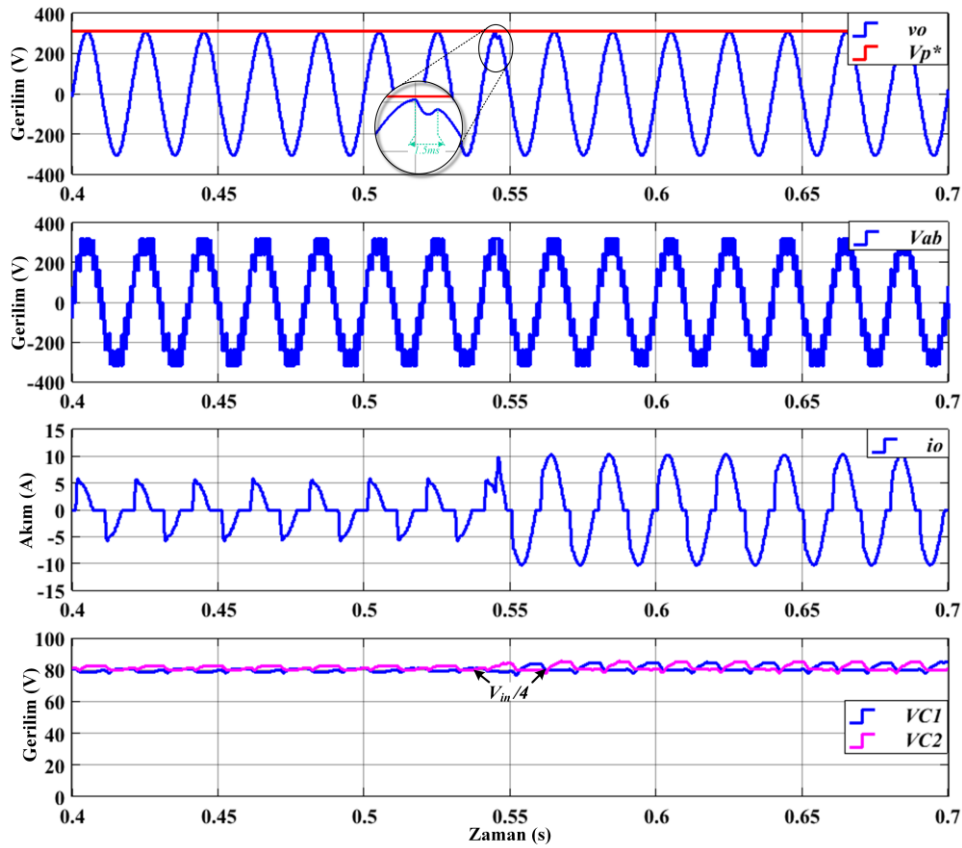


Şekil 5. Doğrusal olmayan yük altında,  $v_o$ ,  $V_{ab}$ ,  $i_o$ ,  $V_{C1}$  ve  $V_{C2}$  gerilimlerinin kararlı durum sonuçları



Şekil 6. Doğrusal yük değişimine karşılık,  $v_o$ ,  $V_{ab}$ ,  $i_o$ ,  $V_{C1}$  ve  $V_{C2}$  gerilimlerinin geçici durum sonuçları

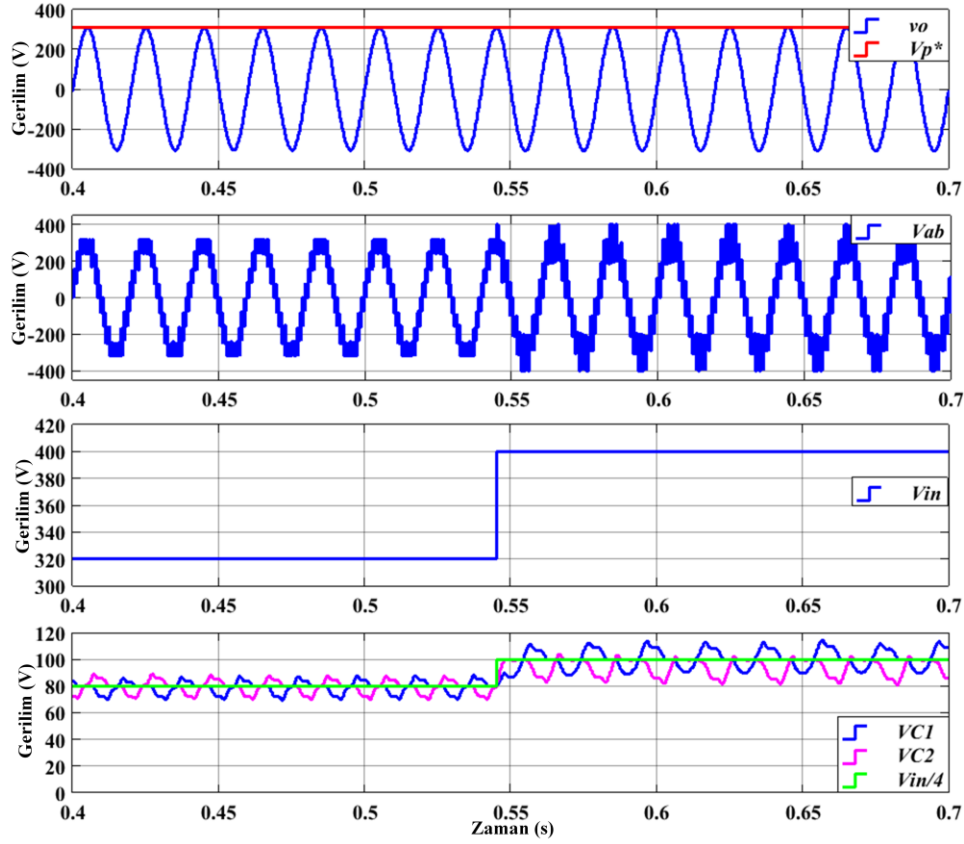
Kontrol algoritmalarının kararlı durum tepkilerinin yanı sıra, güç dönüştürücüsünün giriş veya çıkış tarafındaki değişimlere karşı verdiği dinamik cevaplar önemli bir performans göstergesidir. Önerilen kontrol yapısının yük direnci değiştirilerek dinamik cevaplar test edilmiştir. Şekil 6'da verilen sonuçlardan görüldüğü üzere, başlangıçta 5A tepe değere sahip yük akımı, direncin azaltılmasıyla 10A seviyesine yükselmiştir. Geçiş durumunun öncesinde ve sonrasında,  $V_{ab}$  geriliminin 9 seviyeden oluştuğu şekilden görülmektedir. Geçiş sonrasında, yük geriliminde bir sapma (maksimum %16) meydana gelse de, kontrol algoritması  $1ms$  sonra bu olumsuz etkiyi gidermeyi başarmıştır. Aynı zamanda, kondansatör gerilimlerinin ( $V_{C1}$  ve  $V_{C2}$ ) geçiş öncesi ve sonrasında  $V_{in}/4$  değerinde olduğu yine şekilden görülmektedir. Ancak, geçiş sonrasında yük akımının artması, kondansatör gerilimleri üzerindeki değişimlerin yaklaşık olarak iki katına çıkmasına sebep olmuştur. Doğrusal yük altında gerçekleştirilen bu benzetim çalışmasına benzer olarak, kontrolörün yük değişimine karşılık dinamik cevabı doğrusal olmayan yük altında da incelenmiştir. Şekil 7'de verilen sonuçlardan görüldüğü üzere,  $V_{ab}$ ,  $V_{C1}$  ve  $V_{C2}$  gerilimleri doğrusal yük sonuçlarıyla oldukça benzerlik göstermektedir. Yük akımının tepe değerinin 5A'den 10A'ye yükseldiği anda, evirici geriliminde bir azalma meydana gelse de kontrol algoritması  $1.5ms$  sonra bu etkiyi gidermiştir.



Şekil 7. Doğrusal olmayan yük değişimine karşılık,  $v_o$ ,  $V_{ab}$ ,  $i_o$ ,  $V_{C1}$  ve  $V_{C2}$  gerilimlerinin sonuçları

Yük direnci azaltılarak elde edilen benzetim sonuçları (Şekil 6 ve 7), kontrol algoritmasının yük değişimlerine karşı çıkış gerilimini referansına sabitleyebildiğini göstermiştir. Evirici giriş geriliminin ( $V_{in}$ ) diğer bir değişken parametre olduğu göz önünde bulundurularak, giriş geriliminde 320V'tan 400V'a bir değişim yapılmış ve kontrol algoritmasının dinamik cevabı incelenmiştir. Şekil 8'de verilen sonuçlardan görüldüğü üzere, giriş gerilimi değiştiği andan itibaren  $V_{ab}$ 'deki seviye sayısı sabit kalırken, seviyelerin gerilim değerleri değişmiştir. Bu durum,  $V_{ab}$ 'deki seviyelerin giriş gerilimine bağlı olmasından kaynaklanmaktadır. Dolayısıyla, giriş geriliminin değişmesi, seviyelerin gerilim değerlerini farklı noktalara taşımaktadır. Şekil 8'deki sonuçlardan görüldüğü üzere, kondansatör gerilimleri değişimden önce 80V iken, değişimden sonra 100V seviyesine yükselmiştir. Bu durum Denklem 6 ve 7'de belirtilen doğal dengeleme sayesinde kondansatör gerilimlerinin  $V_{in}/4$  seviyesine getirildiğini göstermektedir.  $V_{C1}$  ve  $V_{C2}$  gerilimleri üzerindeki salınım değerleri, giriş gerilimiyle orantılı olarak artmıştır. Bu durum

kondansatör kapasitesiyle ilişkili olsa da, çıkış gerilimi üzerindeki harmonikler açısından olumsuz etkiler yaratmamaktadır.



**Şekil 8.** Giriş geriliminin 320V'tan 400V'a artması durumunda,  $v_o$ ,  $V_{ab}$ ,  $V_{in}$ ,  $V_{C1}$  ve  $V_{C2}$  gerilimlerinin sonuçları

## 5. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada, şebekeden bağımsız çalışan 9-Seviyeli PEH eviricilerin çıkış gerilimini kontrol etmek için üstün burulma algoritması tabanlı bir kayan kipli kontrol yöntemi tasarlanmıştır. Kontrol yapısının kararlı ve dinamik durumlardaki kabiliyetinin incelenmesi için benzetim çalışmaları yapılmıştır. Kararlı durumda elde edilen sonuçlar, önerilen tümleşik kontrol yapısının hem doğrusal hem de doğrusal olmayan koşullarda başarılı bir regülasyon sağladığını göstermiştir. Bununla birlikte, yük gerilimi üzerindeki harmonik bozulmaların her iki yük durumunda da oldukça düşük seviyelerde olduğu görülmüştür. Kontrol algoritmasının yük ve giriş gerilimindeki değişimlere karşı dinamik cevapları incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar her iki durumda da yük geriliminin referans değerinde tutulabildiğini göstermiştir. Tüm çalışma durumlarında, evirici çıkışında 9 seviyeli bir gerilim üretildiği ve evirici yapısındaki kondansatör gerilimlerinin doğal dengelenme ile eşitlendiği görülmüştür.

## TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışma Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi (Proje No: 65/2020-02) tarafından desteklenmiştir. Katkılarından dolayı Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne teşekkürlerimi sunarım.

**KAYNAKLAR (REFERENCES)**

- [1] M. R. Tür, F. Yaprakdal, Yenilenebilir Enerji Kaynaklarına Dayalı Bir Sistemde Güç Kalitesi Analizi, Kontrolü ve İzlemesi. Gazi Üniversitesi Fen Bilim. Derg. Part C Tasarım ve Teknol., 8: 3 (2020) 572–587.
- [2] N. Güler, E. Irmak, Nötr Kenetlemeli Eviriciler için Çok Giriş – Çok Çıkışlı DA-DA Çevirici Tasarımı ve Kontrolü. Gazi Üniversitesi Fen Bilim. Derg. Part C Tasarım ve Teknol., 7:1 (2019) 49–62.
- [3] E. Kabalcı, R. Canbaz, Design and analysis of a grid-tied single phase nine level asymmetrical inverter. Pamukkale Univ. J. Eng. Sci., 23:5 (2017) 512–518.
- [4] N. Ozturk, R. Canbaz, E. Celik, Constant voltage constant frequency control for single phase three level inverter. 2012 Int. Conf. Renew. Energy Res. Appl., 2012.
- [5] H. Hatas, N. Genc, A. Mamizadeh, FPGA Implementation of SPWM for Cascaded Multilevel Inverter by Using XSG. 4th Int. Conf. Power Electron. their Appl. ICPEA 2019, 25–27, 2019.
- [6] Y. Ounejjar, K. Al-Haddad, L. A. Grégoire, Packed U cells multilevel converter topology: Theoretical study and experimental validation. IEEE Trans. Ind. Electron., 58:4, (2011) 1294–1306.
- [7] H. Vahedi, P. Labbé, K. Al-Haddad, Sensor-Less Five-Level Packed U-Cell (PUC5) Inverter Operating in Stand-Alone and Grid-Connected Modes. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 12:1 (2016) 361-370.
- [8] M. Babaie, M. Sharifzadeh, M. Mehrasa, K. Al-Haddad, Optimized based algorithm first order sliding mode control for grid-connected packed e-cell (PEC) inverter. IEEE Energy Convers. Congr. Expo. ECCE, (2019) 2269–2273.
- [9] M. Sharifzadeh, K. Al-Haddad, Packed E-Cell (PEC) converter topology operation and experimental validation. IEEE Access, 7 (2019) 93049–93061.
- [10] S. Bayhan, H. Komurcugil, Sliding-Mode Control Strategy for Three-Phase Three-Level T-Type Rectifiers With DC Capacitor Voltage Balancing. IEEE Access, 8 (2020) 64555–64564.
- [11] H. Komurcugil, N. Guler, S. Bayhan, Weighting Factor Free Lyapunov-Function-Based Model Predictive Control Strategy for Single-Phase T-Type Rectifiers. IECON 2020 The 46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Singapore, (2020) 4200-4205.
- [12] M. Ahmadijokani, M. Sharifzadeh, M. Mehrasa, F. Sebaaly, K. Al-Haddad, Modified Level-Shifted PWM Technique with Active DC Capacitors Voltages Balancing for Nine-level Packed E-Cell (PEC9) Inverter. Proc. IEEE Int. Conf. Ind. Technol., (2020) 843–848.
- [13] N. Altin, S. Ozdemir, H. Komurcugil, I. Sefa, Sliding-Mode Control in Natural Frame with Reduced Number of Sensors for Three-Phase Grid-Tied LCL-Interfaced Inverters. IEEE Trans. Ind. Electron., 66:4 (2019) 2903–2913.
- [14] I. Sefa, S. Ozdemir, H. Komurcugil, N. Altin, Comparative study on Lyapunov-functionbased control schemes for single-phase gridconnected voltage-source inverter with LCL filter. IET Renew. Power Gener., 11:11 (2017) 1473–1482.
- [15] N. Güler, Proportional Resonant and Proportional Integral Based Control Strategy for Single Phase Split Source Inverters. 9th Int. Conf. Renew. Energy Res. Appl., (2020) 510–514.
- [16] F. Bagheri, H. Komurcugil, O. Kukrer, N. Guler, S. Bayhan, Multi-Input Multi-Output Based Sliding-Mode Controller for Single-Phase Quasi-Z-Source Inverters. IEEE Trans. Ind. Electron., 46 (2019).

- [17] S. Bayhan, M. Trabelsi, H. Abu-Rub, M. Malinowski, Finite-Control-Set Model-Predictive Control for a Quasi-Z-Source Four-Leg Inverter Under Unbalanced Load Condition. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 64:4 (2017) 2560–2569.
- [18] S. Bayhan, H. Komurcugil, A Sliding-Mode Controlled Single-Phase Grid-Connected Quasi-Z-Source NPC Inverter With Double-Line Frequency Ripple Suppression. *IEEE Access*, 7 (2019) 160004-160016.
- [19] H. Komurcugil, S. Biricik, Time-Varying and Constant Switching Frequency-Based Sliding-Mode Control Methods for Transformerless DVR Employing Half-Bridge VSI. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 64:4 (2017) 2570–2579.
- [20] N. Guler, S. Biricik, S. Bayhan, H. Komurcugil, Model Predictive Control of DC-DC SEPIC Converters with Auto-tuning Weighting Factor. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 46 (2020).
- [21] H. Komurcugil, S. Bayhan, Super-Twisting Sliding Mode Control for Grid-Tied T-Type qZSI with Reduced Capacitor Voltage. *IEEE Int. Symp. Ind. Electron.*, (2020) 790–795.
- [22] S. Adak, H. Cangi, A. S. Yılmaz, Doğrusal Olmayan Yüklerde Güç Faktörünün Düzeltilmesi ve Harmonik Bileşenlerin Süzülmesi. *Gazi Üniversitesi Fen Bilim. Derg. Part C Tasarım ve Teknol.*, 7:1 (2019) 153–164.



## Traffic Classification and Comparative Analysis with Machine Learning Algorithms in Software Defined Networks

Özgür TONKAL<sup>1,\*</sup> , Hüseyin POLAT<sup>2</sup> 

<sup>1</sup>Samsun Üniversitesi, Bilgi İşlem Daire Başkanlığı, 55080, Canik, SAMSUN

<sup>2</sup>Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, 06560, Yenimahalle, ANKARA

### Abstract

In computer networks, diverse applications generate network traffic with different characteristics. Network traffic classification is significant to manage networks better, improve service quality and ensure security. Software-Defined Networks (SDN) provides flexible and adaptable techniques for traffic classification with its programmable structure. SDN flows naturally exhibit particular characteristics of network applications and protocols. Therefore, it can be said that SDN can present significant opportunities in traffic classification using machine learning. This study proposes a traffic classification approach using machine learning models in SDN. In this study, DNS, Telnet, Ping and Voice traffic flows were created on the SDN using the Distributed Internet Traffic Generator (D-ITG) tool. Twelve-features representing these traffic flows (the number of packets transmitted, average transmission time, the number of instantly transmitted packets, etc.) were determined, and over the SDN controller in the physical network, a real-time dataset was created by collecting data depending on the features. Later, the performance of k Nearest Neighbor (k-NN), Support Vector Machine (SVM), Multi-Layer Perceptron (MLP), Decision Tree (DT) and Naive Bayes (NB) machine learning models were tested for traffic classification on this dataset. When the k-NN model was tested on this real-time dataset, its classification accuracy was obtained as the maximum with 99.4%. Therefore, this model has been determined as a machine learning giving the highest classification performance with the lowest cost flow features in traffic classification in SDN.

### Article Info

Research article

Received: 27/01/2021

Accepted: 05/02/2021

### Makale Bilgisi

Araştırma makalesi

Başvuru: 27/01/2021

Kabul: 05/02/2021

### Keywords

Software-Defined Network

Machine Learning

Traffic Classification

### Anahtar Kelimeler

Yazılım Tanımlı Ağ

Makine Öğrenmesi

Trafik Sınıflandırma

## Yazılım Tanımlı Ağlarda Makine Öğrenme Algoritmaları ile Trafik Sınıflandırma ve Karşılaştırmalı Analiz

### Öz

Bilgisayar ağlarında, farklı uygulamalar farklı özelliklere sahip ağ trafiği üretirler. Ağları daha iyi yönetmek, hizmet kalitesini artırmak ve güvenliği sağlamak için ağ trafiğinin sınıflandırılması önemlidir. Yazılım Tanımlı Ağlar (YTA) programlanabilir yapısı ile trafik sınıflandırması için esnek ve uyarlanabilir teknikler sağlar. YTA akışları doğal olarak ağ uygulamaları ve protokollerinin belirli özelliklerini sergiler. Dolayısıyla, YTA'nın makine öğrenmesi kullanarak trafik sınıflandırmada önemli fırsatlar sunduğu söylenebilir. Bu çalışmada, YTA'da makine öğrenme modellerini kullanarak bir trafik sınıflandırma yaklaşımı öneriyoruz. Dağıtık İnternet Trafik Oluşturucu (D-ITG) aracı kullanılarak YTA üzerinde DNS, Telnet, Ping ve Ses trafik akışları oluşturulmuştur. Bu trafik akışlarını temsil eden on iki öznitelik (iletilem paket sayısı, ortalama iletim süresi, anlık iletilen paket sayısı vb.) belirlendi ve fiziksel ağdaki YTA kontrolcüsü üzerinden gerçek zamanlı olarak özniteliklere ait veriler toplanarak bir veri seti oluşturuldu. Daha sonra da bu veri seti üzerinde trafik sınıflandırması için k En Yakın Komşu (k-EYK), Destek Vektör Makinesi (DVM), Çok Katmanlı Algılayıcı (ÇKA), Karar Ağacı (KA) ve Naive Bayes (NB) makine öğrenme modellerinin başarımları test edildi. Gerçek zamanlı olarak oluşturulan bu veri seti üzerinde k En Yakın Komşu modeli kullanıldığında %99.4 doğruluk oranı ile en yüksek sınıflandırma doğruluğu elde edilmiştir. Dolayısıyla, YTA'da trafik sınıflandırmasında, en düşük maliyetli akış öznitelikleri ile en yüksek sınıflandırma performansı veren makine öğrenme modeli olduğu tespit edilmiştir.

## 1. INTRODUCTION

The increases in internet data traffic and diversity have made network traffic classification a critical issue for computer science. Classification methods are utilized to increase network service quality, to use network resources efficiently, and to detect attacks and anomalies on the network using traffic analysis [1].

In traditional networks, various methods, such as rule-based, load-based, and correlation-based are used for network traffic classification. However, these methods also have different problems of their own [2].

Rule-based methods are widely used in network traffic classification. Predefined rules are used to classify packets in the network. Network packet header information and port information are the properties on which the classification is based. Although this method provides very high performance for the known applications, it has not been successful for applications using dynamic port numbers. Therefore, network operators wanted to use different classification solutions [3].

The classification performance decrease due to the dynamic ports' use in rule-based methods has led researchers to classify using the load-information carried by the packets flowing over the network. This method, also known as the deep packet analysis, removed connection number and IP address information dependency. Even though the protocol header information in use changes, the classification performance will be high because of the matching process of characteristic signatures or patterns in the packet loads. However, the high costs of hardware used for deep packet analysis and the problem of not detecting the encrypted packet contents, which have been increasing recently, have created the limitations of these methods [4].

To eliminate the limitations and difficulties encountered in rule-based and load-based classification methods, researchers have used correlation-based network classification methods. The statistical properties of the flows making up the network traffic are used, such as packet size, arrival rates and flow time. Classification is performed by including different machine learning techniques such as DT, SVM, k-NN into the classification process. Classification accuracy is relatively higher for packs containing encrypted traffic since the packet content is not handled specially. However, since the correlation analysis carried out in each flow requires additional calculations, it creates an extra consumption when creating classified dataset. Also, traditional networks consist of many routers and switches managed by many different protocols. Because of this distributed structure, the application of machine learning methods on traditional networks poses a significant challenge [5].

Unlike traditional network architecture, SDN separates the control plane from the data plane, allowing the network to be programmed directly over a central controller [6]. The control plane is transported to a high-performance server, and the management of the network is performed through central controller software. The data plane is left on routers or switches supported by OpenFlow protocol and is only responsible for the packs' transmission. Although many protocols can be used in SDN architecture, the OpenFlow protocol is the most successful [7]. SDN provides data flow through the OpenFlow protocol. The controller collects network flow information through the OpenFlow protocol and can direct it to switches by writing dedicated rules. SDN allows network administrators to analyze traffic in software without the need for any physical hardware.

Machine learning-based methods use statistical properties learned from data for traffic classification. Since package contents are not utilized for classification, they can be classified as encrypted data. Machine learning methods reach the necessary information for the traffic classification via OpenFlow protocol in SDN, and the classification can be performed with a low calculation cost.

For traffic classification using machine learning, various approaches have been carried out. Wang et al. [8] proposed a Quality of Service (QoS) conscious traffic classification system, using a semi-controlled learning algorithm and Deep Packet Inspection (DPI). Traffic flows of both known and unknown applications are divided into different QoS classes with the method proposed. D. Rossi and S. Valenti [9] focused on the classification of applications running over the User Datagram Protocol (UDP) in their work. The UDP network traffic obtained with the Netflow network monitoring tool is classified with the SVM algorithm. He et al. [10] proposed a software-defined virtual traffic classification model called vTC, which



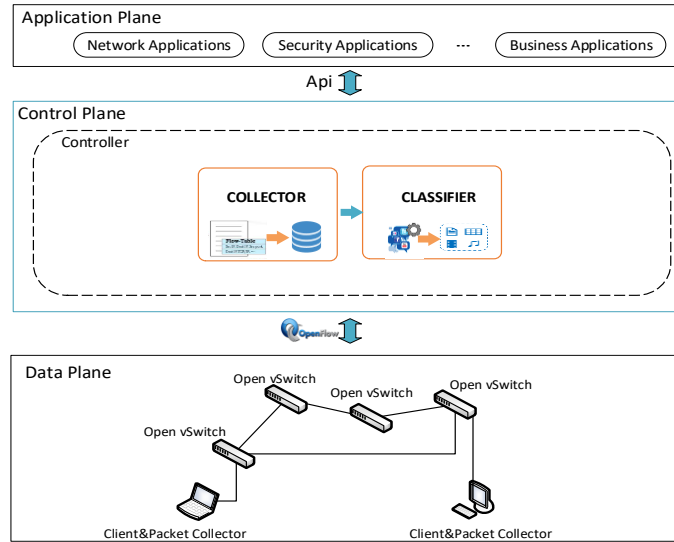
dynamically determines the most suitable flow properties and the most effective machine learning classifier. They identified basic and advanced flow properties and used six different classification algorithms, k-NN, SVM, MLP, DT, NB and AdaBoost. Amaral et al. [11] proposed an SDN-based traffic classification architecture in their study. In their study, 500 samples from each of Youtube, Vimeo, Facebook, LinkedIn, Skype, BitTorrent, Web Browsing (HTTP) and Dropbox applications were collected, and then these traffic samples were classified with the specified machine learning algorithms (Random Forest (RF), Stochastic Gradient Boosting (SGB) and Extreme Gradient Boosting (EGB)). Wang et al. [12] have proposed the Software-Defined Network Home Gateway model (SDN-HGW) to manage better smart home networks. In the study, an encrypted data packet classifier was developed using three deep learning-based approaches: MLP, Stacked Autoencoder (SAE) and Convolutional Neural Network (CNN). For the developments of these classifiers called DataNets, a dataset including more than 20,000 encrypted packages from 15 applications was used. The results obtained have shown that the developed DataNets can be applied to the SDN-HGW model for the real-time processing in the smart home network with accurate packet classification and high computation efficiency. Lim et al. [13] proposed an SDN architecture that could classify traffic using deep learning methods. In their study, Deep learning models, including the Multi-Layer Long Short Term Memory (LSTM) model and the combination of CNN and single-layer LSTM models, were used to classify dataset consisting of Remote Desktop Connection (RDP), Skype, Secure Shell (SSH), BitTorrent and Hyper-Text Transfer Protocol (HTTP) traffics. Meenaxi M Raikar et al. [14] have stated in their study that traditional traffic classification approaches have limitations due to heavy data traffic. To overcome these limitations, they proposed a model in which SDN architecture and machine learning methods are used together. HTTP, E-mail and Video-Audio (streaming) traffic data are classified with SVM, NB and the Nearest Centroid Classifier (NCC).

When the studies are examined, it is seen that machine learning methods give outstanding results in traffic classification. The datasets and the traffic flow characteristics selected have been determinant in the accuracy rates obtained in traffic classification using machine learning. The approach proposed is aimed to contribute to the studies in this field.

This study proposes an architectural approach classifying the traffic flow in SDN using machine learning methods. The traffic flows of DNS, Telnet, Ping and Voice were created in the network environment created using SDN architecture. These traffic flows were collected in real-time and classified using machine learning methods. The number of features to use for machine learning methods was determined based on maintaining compatibility with the application (SDN controller), and the study refrained from excessive and complicated calculations. Although the network traffic class is predetermined, it can be adapted to suit the destination. The system presented offers network operators a solution to classify the network traffic to increase network efficiency and service quality.

## 2. MATERIAL AND METHOD

This study proposes an architectural approach classifying the traffic flow in SDN using machine learning methods. The proposed approach consists of two stages. In the first stage, real-time traffic flows of DNS, Telnet, Ping and Voice were formed in the SDN simulation environment, and these traffic data were cumulated with the Collector module on the controller. The features of the traffic flows to be used in classification were determined and the model was trained by using k-NN, SVM, MLP, DT and NB machine learning models. In the second stage, again using trained models via the Classifier module on the controller, a real-time traffic classification was carried out. Figure 1 shows the architectural structure of the proposed approach.



**Figure 1.** The Proposed System Architecture

## 2.1. Software-Defined Network Environment and Dataset Generation

As shown in Figure 2, a basic network topology has been created by using a virtualization environment (VirtualBox-VM). The topology has consisted of one controller, one Layer-2 switch, and three client computers (their system features are shown in Table 1) installed on five virtual machines. Nodes in the network were modeled as VM, and therefore some delay has been experienced in network traffic. Another option was to use the Mininet simulation environment commonly used in researches. However, a single VM simulation environment was not preferred to create a simulation close to the real environment.

**Table 1.** System Features

<i>Operating System</i>	<i>Ubuntu 14.04_64 bit Core i7 16 GB RAM</i>
<i>SDN Controller</i>	<i>RYU(4.30)_ 2 GB RAM</i>
<i>Switch</i>	<i>Open vSwitch (2.0.2) 2 GB RAM</i>
<i>Hosts</i>	<i>Ubuntu 14_04_64_bit 2 GB RAM</i>
<i>Network Simulation Environment</i>	<i>VirtualBox-VM</i>

An overlay network was created to allow the traffic, which had been generated by the client computers, to pass through the switch virtual machine to establish communication instead of using the internal switching mechanism of the virtual machines making up the SDN environment. Here, the study aims to create a network environment that is as realistic as possible and prevent delays. For client computers in the network, two interfaces were identified. The first interface was connected to the internal network, and the second interface to the switch (OVS) using the VXLAN tunnel. The switch was connected to both the client computers via the VXLAN interface and directly to the controller by the internal network. The RYU controller was placed in the Controller VM.

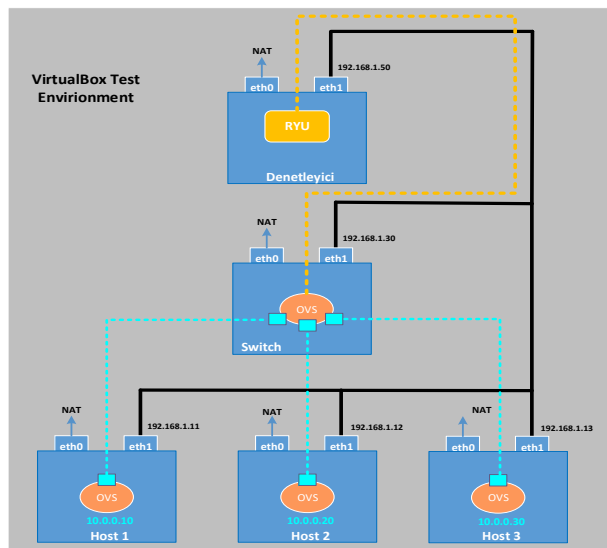


Figure 2. Simulation Network Topology

Once the SDN is configured, the controller needs to be aware of the packets flowing through the switch between client computers. For this, the controller can view the flow information shown in Table 2 at every second, using the Python script coded.

Table 2. Flow Data Features-1

Flow	Description
time	UTC value at the time of flow information
datapath	Key ID in RYU
in-port	incoming traffic port
eth_src	source MAC address of the flow
eth_dst	destination MAC address of the flow
out-port	outbound traffic port
total_packets	total flow packets
total_bytes	the total size of flow packets (in Bytes)

The flow data shown in Table 2 were used as input data to a script named "traffic\_classifier.py" The script created a Flow object with the features shown in Table 3, using the flow data shown in Table 2. By using the features in the flow data, the number of distinguishing features to be used in traffic classification was increased.

Table 3. Flow Data Features-2

Feature	Description
Forward_delta_packets	The number of packets seen since the last forward stream detection
Forward_delta_bytes	Bytes seen since the last forward stream detection
Forward Instantaneous Packets per Second	Instantaneous packets per second in the forward direction (src-> dst)
Forward Average Packets per second	The average number of packets per second in the forward direction (src-> dst)
Forward Instantaneous Bytes per Second	Instantaneous number of bytes per second in the forward direction (src-> dst)
Forward Average Bytes per second	Instantaneous number of bytes per second in the forward direction (src-> dst)
Reverse_delta_packets	The number of packets seen since the last reverse flow detection
Reverse_delta_bytes	Bytes seen since the last reverse flow detection

<i>DeltaReverse Instantaneous Packets per Second</i>	<i>instantaneous packets per second in reverse direction (dst-&gt; src)</i>
<i>Reverse_avg_pps</i>	<i>The average number of packets per second in the reverse direction (dst-&gt; src)</i>
<i>Reverse_avg_bps</i>	<i>average bytes per second (dst-&gt; src)</i>
<i>Reverse Instantaneous Bytes per Second</i>	<i>instantaneous bytes per second in the reverse direction (dst-&gt; src)</i>
<i>Traffic Type</i>	<i>traffic type (ping-telnet-voice-DNS)</i>

The Traffic\_classifier.py script can perform the following tasks:

*Collection of the Training Data:* For the traffics of DNS, Telnet, Ping, and Voice, training data are collected. The traffic must be flowing between the two client computers before the script file is operated.

*Classification Using Machine Learning:* Classifying the type of traffic flow between client computers using classification algorithms.

## 2.2. Dataset Generation

The D-ITG application was utilized to generate traffic flow data for training Machine Learning models. D-ITG is defined as a platform that can generate IPv4 and IPv6 traffic by accurately replicating the workload of existing Internet applications [15]. In this study, Ping, Telnet, DNS, Voice (G.711) traffics were created through the D-ITG application.

First, a specific traffic flow between a particular pair of client computers was simulated using D-ITG or other tools. Second, the traffic\_classifier.py script file was started with the appropriate options to train the traffic type. The script initiates the RYU controller and the simple\_monitor\_AK.py (a modified version of simple\_monitor\_13.py). Data generated from the simple monitor script is collected and transformed to update Flow object features. The Flow object features are then periodically exported to the Comma Separated Variables file (CSV). Once CSV files are generated for each traffic type, they are combined into a complete Pandas Dataframe object used for model training and testing.

## 2.3. Data Preprocessing

The collected data were subjected to several preprocessing stages before being used for machine learning model training. First, the rows containing missing data were identified and removed. The mean values of relevant features were replaced in place of the removed ones to avoid possible information loss. Repeated or linearly increasing data may cause false predictions in the process of training machine learning models. Therefore, the features of "the number of transmitted packets", "the number of returned packets", "the amount of transmitted data" and "the amount of returned data" were removed from the dataset. Table 3 shows the features to use in the learning process. However, the high correlation level between the features determined during machine learning model training does not contribute to model training. The highly correlated features should be removed to increase the machine learning algorithms' efficiency. For this, the Principal Component Analysis (PCA) algorithm was used to determine the main components in the dataset and the non-parser features were removed from the dataset.

At the end of the data collection and data preprocessing, a dataset consisting of 10145 rows and 13 columns (12 features and 1 class feature) was obtained. This dataset consists of 2692 Ping, 2438 Telnet, 2554 Voice and 2461 DNS packets evenly.

### 3. TRAFFIC CLASSIFICATION WITH MACHINE LEARNING ALGORITHMS AND A COMPARATIVE ANALYSIS

Different classification algorithms are used to solve classification problems. Each classification algorithm has a unique mathematical model that it uses. Therefore, the results obtained show variations. It is only possible to determine which model is more successful by trying different classification models. This study tested the classification algorithms widely used today and compared their success rates.

A python-based scikit-learn library was used to test the performance of classification algorithms. This library supports many machine learning models [16]. This study focused on k-NN, SVM, MLP, DT and NB machine learning classification algorithms frequently used in classification problems. The features of these classification algorithms can be summarized as follows. k-NN is an algorithm used in both classification and regression problems. In this algorithm, the distance of the new data to join in the dataset is calculated according to the existing data, and its closest neighbors in the k number are checked. [17]. Euclidean, Manhattan, and Minkowski distance functions are used for distance calculations generally. The SVM is used to separate data belonging to two classes in the most appropriate way [18]. For this, decision boundaries, or in other words, the hyperplanes, are determined. The Linear Support Vector Machine (L-SVM) and the Radial Kernel Support Vector Machine (R-SVM) can be selected as the classifiers. DT is a decision support classifier that enables predictions using tree-like structures. Each node represents a stream tag, and root-to-leaf paths represent classification rules. Entropy is used for categorical variables, and the Least Squares method is used for Gini continuous variables. MLP is a type of feed-forward neural network working according to the supervised learning method. By giving the inputs and expected outputs to the network, the nodes' weights optimization is aimed. While feed-forward calculates the network output, back-propagation ensures the errors detected to be reduced by updating the weights in the net. This process repeats until faults in the network are minimized, or training is terminated. NB is a classifier based on Bayes decision theory using probability calculations. It aims to select the decision with the highest probability. It has different algorithms such as Gauss (G-NB), Multinomial (M-GB), and Bernoulli (BNB) distribution. Training and testing of machine learning models were carried out using the python\_3 core structure in the Jupyter Notebook experiment environment with 16-GB RAM, 64-bit operating system, and 7-core 2.60-GHz processor.

Hyperparameter-adjustments were made on the models used to obtain optimum efficiency. Table 4 shows the algorithms and hyperparameter values used. During the models' training and testing processes, deviations (bias) and errors can occur due to the data distribution. The k-fold Cross-Validation Method (k=10) was used to prevent this situation. The k-Fold Cross Validation method divides the dataset into equal parts according to a specified number of k, allows each section to be used for both training and testing. Thus, possible problems of the model, such as overfitting and selection bias, are eliminated. The training and testing procedures were repeated ten times for each classification model, and so average values were calculated.

**Table 4.** Hyper Parameters Used in Algorithms

<i>Algorithms</i>	<i>Hyperparameters</i>
<i>k-NN</i>	<i>metric='minkowski', n_neighbors=2, p=2, weights='uniform'</i>
<i>SVM</i>	<i>C=2.0, kernel='rbf'</i>
<i>MLP</i>	<i>activation='logistic', solver='lbfgs', alpha=0.1, hidden_layer_sizes=(100, 100), dropout value=0.1</i>
<i>DT</i>	<i>criterion='gini', max_depth=10</i>
<i>NB</i>	<i>estimator=GaussianNB, iid='deprecated'</i>

### 3.1. Performance Metrics

This study used the confusion matrix to compare the performance of the classification models used. The confusion matrix is a table summarizing how successful the classification model has been (Table 5). It contains as many rows and columns as the number of classes the model has.

**Table 5.** Binary Classification Confusion Matrix

		<i>Predicted Class</i>	
		<i>0</i>	<i>1</i>
<i>Actual Class</i>	<i>0</i>	<i>True Negative (TN)</i>	<i>False Negative (FN)</i>
	<i>1</i>	<i>False Positive (FP)</i>	<i>True Positive (TP)</i>

While the samples of a particular class correctly defined by the classifier are placed in the True Positive (TP) indices, the samples of other accurately identified classes are placed in the True Negative (TN) indices. Similarly, specimens incorrectly predicted by the classifier are placed in the False Positive (FP) and False Negative (FN) indices in the confusion matrix. Accuracy, Precision, Sensitivity, F1 criterion (F-Score), Specificity, and ROC curves criteria are calculated using the values obtained in the complexity matrix (Equations 1-7). These criteria will be used to compare classification models.

- Accuracy: It is the criterion that gives the ratio of correctly classified samples to all samples (Equation 1).

$$\frac{TP+TN}{TP+FP+TN+FN} \quad 1$$

- Precision: It is the ratio of correctly classified samples to total positive values (Equation 2).

$$\frac{TP}{TP+FP} \quad 2$$

- Sensitivity: The ratio of correctly classified samples to true positive values (Equation 3).

$$\frac{TP}{TP+FN} \quad 3$$

- Specificity: It is the ratio of the correct negative number to the sum of the correct negative and false positive numbers (Equation 4).

$$\frac{TN}{TN+FP} \quad 4$$

- (F-Score): It is the harmonic mean of the Precision and Sensitivity values (Equation 5).

$$\frac{2*K*G}{K+G} \quad 5$$

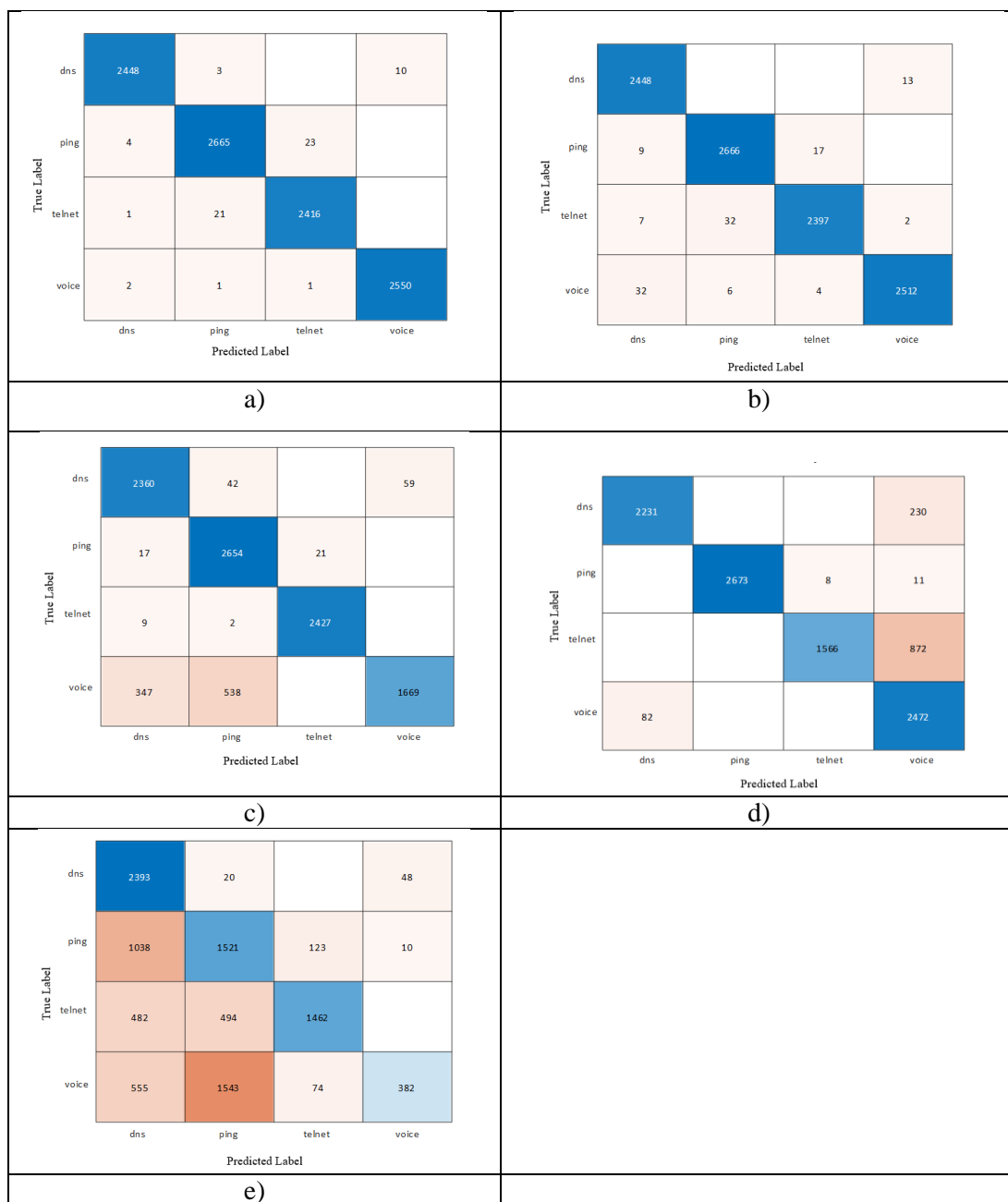
- ROC AUC: ROC (Receiver Operator Characteristic) is the probability curve used for different classes. It is often used to compare the ML algorithms' performances when unbalanced datasets are used. In the ROC curve, there are False Positive Ratio values (Equation 6) on the X-axis and True Positive Ratio values (Equation 7) on the Y-axis. AUC (Area Under the Curve) refers to the area under the ROC curve. The area under the ROC curve shows the performance of the classifier.

$$\frac{FP}{FP+TN} \quad 6$$

$$\frac{TP}{TP+FP} \quad 7$$

### 3.1. Comparative Analysis

The complexity matrices of the different classification models used are shown in Figure 3.



**Figure 3.** Complexity Matrices of the models used; a) k-NN, b) MLP, c) DT, d) SVM, e) NB

Comparison of classification models according to the criteria obtained by using confusion matrices is shown in Table 6.

**Table 6.** Comparison of Models (average of 10 runs).

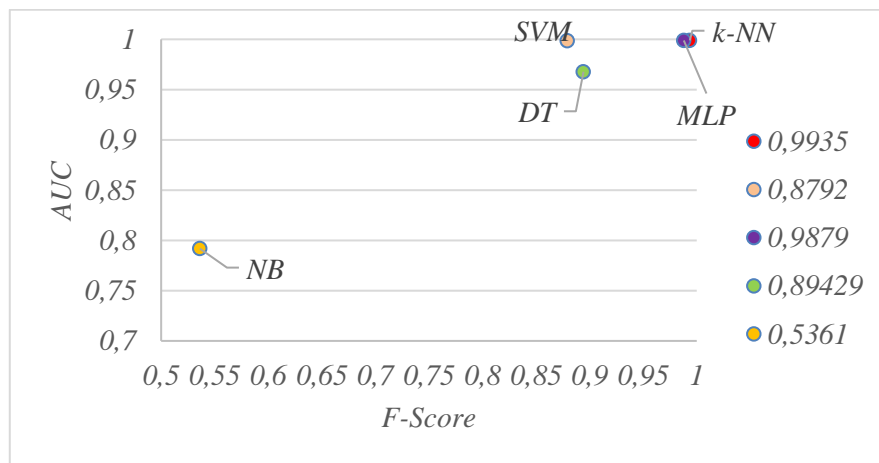
Model	Accuracy	Sensitivity	Specificity	Precision	F <sub>1</sub> Score	AUC
<i>k</i> -NN	<b>0.9935</b>	<b>0.9935</b>	<b>0.9978</b>	<b>0.9935</b>	<b>0.9935</b>	<b>0.99895</b>
SVM	0.8814	0.8774	0.9604	0.9122	0.8792	0.998625
MLP	0.9879	0.9879	0.9959	0.9880	0.9879	0.998875
DT	0.89798	0.89845	0.96572	0.91024	0.89429	0.967725
NB	0.5675	0.5716	0.8551	0.6775	0.5361	0.791825

As shown in Table 6, although the MLP and the *k*-NN models gave outstanding results, the *k*-NN classification model gave better results than other models in all criteria. When the models' working times were compared, it was observed that while the *k*-NN was the fastest trained method, the decision tree was the fastest estimation method (Table 7). Although the MLPs' test performance was high, their training time was longer than other networks.

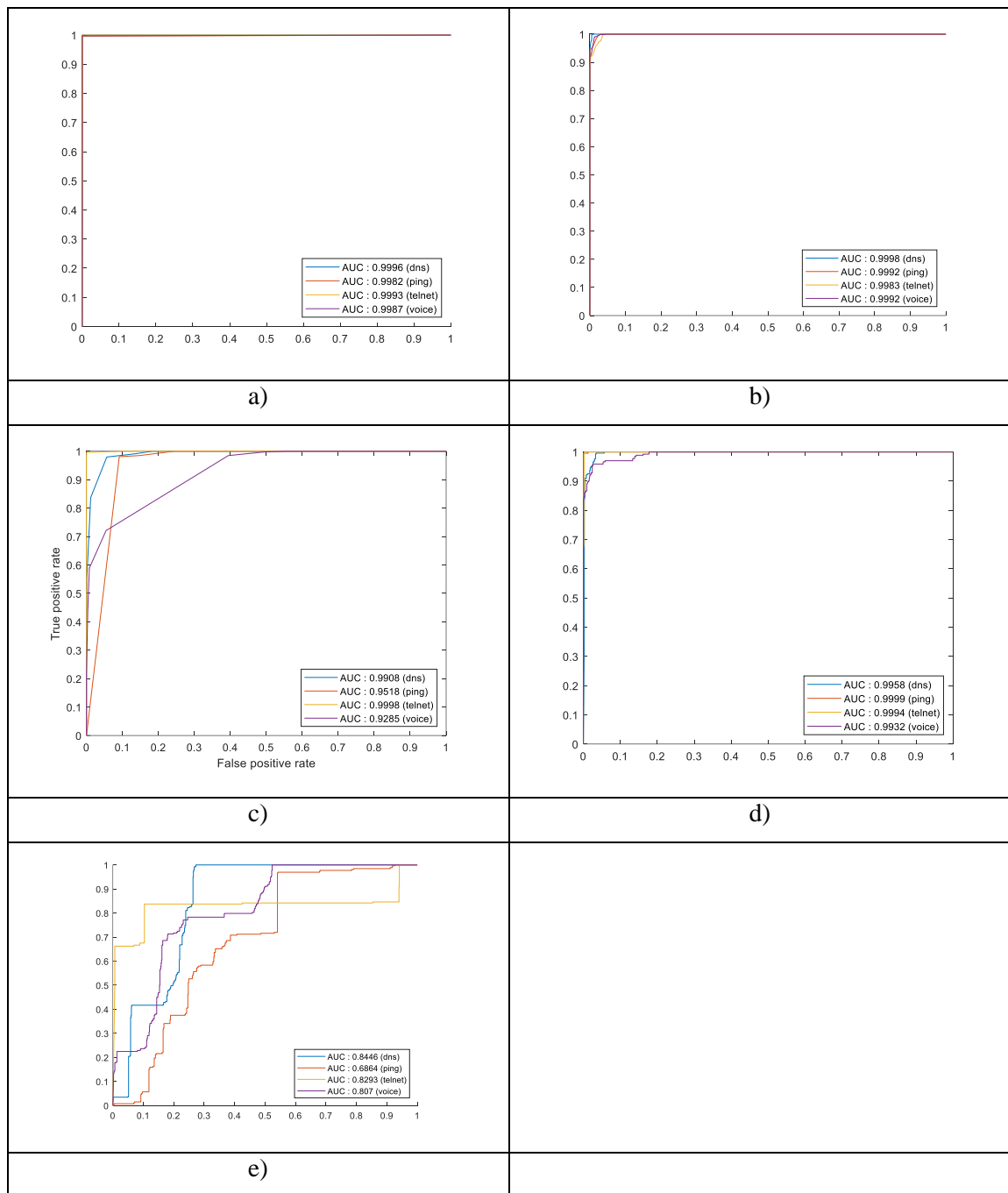
**Table 7.** Comparison of Models Run Times (average of 10 runs).

Model	Training Time (sec)	Test Time (sec)
<i>k</i> -NN	<b>0.2104</b>	0.1783
SVM	21.812	0.8334
MLP	1401.3	0.1053
DT	0.73381	<b>0.06723</b>
NB	0.7492	0.11

In Figure 4, a graphic was created using the AUC and F criteria of the models. According to this graph, the *k*-Nearest Neighbor model gave better results than other models. The ROC diagrams of the classification models used are given in Figure 5. ROC diagrams show the rate which the classifier estimates correctly. When this diagram is examined, the performance of the *k*-NN model is seen.

**Figure 4.** Graph created with AUC and F1 values obtained as a result of running the models





**Figure 5.** ROC diagrams of the models used, a) k-NN, b) MLP, c) DT, d) SVM, e) NB

The results of similar traffic classification studies using machine learning methods in SDN, whose reviews are in the introduction, are given in Table 8 comparatively. It is seen that the results obtained with the proposed traffic classification approach (k-NN and MLP) are more successful than the results obtained in other studies [8, 9, 11]. Comparison results are difficult to justify, as similar studies in the literature have been carried out using different models on different datasets.

**Table 8.** Comparison of the results with similar studies in the literature.

<i>Dataset</i>	<i>Feature Selection Method</i>	<i>Machine Learning Algorithm</i>	<i>Accuracy (%)</i>	<i>Ref.</i>
<i>Real internet traffic data</i>	<i>Forward Selection Algorithm</i>	<i>K-Means Laplacian SVM</i>	<i>Average 90.0</i>	<i>[8]</i>
<i>Their own dataset</i>	-	<i>SVM</i>	<i>Average 90.0</i>	<i>[9]</i>
<i>KDD (2009)</i>	-	<i>k-NN, SVM, MLP, DT, NB, AdaBoost</i>	<i>Average 95.6</i>	<i>[10]</i>
<i>Their own dataset</i>	<i>PCA</i>	<i>RF SGM EGM</i>	<i>86.4 85.5 87,2</i>	<i>[11]</i>
<i>Their own dataset</i>	-	<i>MLP SAE CNN</i>	<i>96.0 98.0 98.0</i>	<i>[12]</i>
<i>PCAP</i>	-	<i>LSTM CNN+LSTM</i>	<i>Average 95.0</i>	<i>[13]</i>
<i>Their own dataset</i>	-	<i>SVM NB NCC k-NN</i>	<i>92.3 96.8 91.02 99.4</i>	<i>[14]</i>
<b><i>Our Dataset</i></b>	<i>PCA</i>	<i>MLP Decision Tree NB</i>	<i>98.8 89.8 56.8</i>	

#### 4. CONCLUSION

Classification of traffic flows in today's IP networks has become a significant research area with the adoption of Machine Learning methods and Software Defined Network principles. Due to the dynamic and encrypted nature of the existing traffic, traditional traffic classification methods that involve the identification of traffic based on port number and load can be inadequate.

In this study, traffic classification was made using different machine learning models on SDN architecture. The real-time network packets were captured on the SDN architecture created closely similar to the real environment. Network traffic was classified using five different Machine Learning models (k-NN, SVM, MLP, DT and NB) used for classification problems today. The working time and classification performance of the models were compared. k-NN has been the most successful model with an accuracy of 99.4%. The MLP model has come next with a 98.8% performance rate. The results obtained have been promising for future studies on traffic prioritization and QoS.

Various issues need to be considered for further studies. The network environment used should be at the most similar confusion level to real environments, and also the factors affecting the network service quality, such as scalability and availability, should also be taken into account. Besides, since most of today's internet traffic consists of video and game applications, the application is planned to be developed to include high-density traffic packages. Models such as Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise (DBSCAN) or CNN are also aimed to be used in future studies.

#### REFERENCES

- [1] Tahaei, Hamid, et al. "The rise of traffic classification in IoT networks: A survey." *Journal of Network and Computer Applications* 154 (2020): 102538.

- [2] Nguyen, Thuy TT, and Grenville Armitage. "A survey of techniques for internet traffic classification using machine learning." *IEEE communications surveys & tutorials* 10.4 (2008): 56-76.
- [3] Dehghani, Fereshte, et al. "Real-time traffic classification based on statistical and payload content features." *2010 2nd International Workshop on Intelligent Systems and Applications*. IEEE, 2010.
- [4] P. Barlet-Ros Co-Advisor and J. Solé-Pareta in, "Network Traffic Classification: From Theory to Practice Valentín Carela-Español," no. October, 2014.
- [5] A. Mestres *et al.*, "Public Review for Knowledge-Defined Networking," *ACM SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, vol. 47, no. 3, pp. 2–10, 2017.
- [6] F. Ieee *et al.*, "Software-Defined Networking : A Comprehensive Survey," vol. 103, no. 1, 2015.
- [7] OpenFlow Switch Specification v1.1.0. Available online: <http://archive.openflow.org/documents/openflowspec-v1.1.0.pdf>, Erişim Tarihi Ağustos, 20, 2019.
- [8] P. Wang, S. C. Lin, and M. Luo, "A framework for QoS-aware traffic classification using semi-supervised machine learning in SDNs," in *Proceedings - 2016 IEEE International Conference on Services Computing, SCC 2016*, 2016, pp. 760–765, doi: 10.1109/SCC.2016.133.
- [9] D. Rossi and S. Valenti, "Fine-grained traffic classification with Netflow data," *IWCMC 2010 - Proc. 6th Int. Wirel. Commun. Mob. Comput. Conf.*, pp. 479–483, 2010, doi: 10.1145/1815396.1815507.
- [10] L. He, C. Xu, and Y. Luo, "VTC: Machine learning based traffic classification as a virtual network function," *SDN-NFV Secur. 2016 - Proc. 2016 ACM Int. Work. Secur. Softw. Defin. Networks Netw. Funct. Virtualization, co-located with CODASPY 2016*, pp. 53–56, 2016, doi: 10.1145/2876019.2876029.
- [11] P. Amaral, J. Dinis, P. Pinto, L. Bernardo, J. Tavares, and H. S. Mamede, "Machine learning in software defined networks: Data collection and traffic classification," in *Proceedings - International Conference on Network Protocols, ICNP*, 2016, vol. 2016-December, doi: 10.1109/ICNP.2016.7785327.
- [12] P. Wang, F. Ye, X. Chen, and Y. Qian, "Datanet: Deep learning based encrypted network traffic classification in SDN home gateway," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 55380–55391, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2872430.
- [13] H. K. Lim, J. B. Kim, K. Kim, Y. G. Hong, and Y. H. Han, "Payload-based traffic classification using multi-layer LSTM in software defined networks," *Appl. Sci.*, vol. 9, no. 12, 2019, doi: 10.3390/app9122550.
- [14] M. M. Raikar, S. M. Meena, M. M. Mulla, N. S. Shetti, and M. Karanandi, "Data Traffic Classification in Software Defined Networks (SDN) using supervised-learning," *Procedia Comput. Sci.*, vol. 171, no. 2019, pp. 2750–2759, 2020, doi: 10.1016/j.procs.2020.04.299.
- [15] D. Manual, A. Botta, W. De Donato, A. Dainotti, S. Avallone, and A. Pescap, "D-ITG 2.8.1 Manual," pp. 1–35, 2013.
- [16] Scikit-learn Tutorials [https://scikit-learn.org/stable/user\\_guide.html](https://scikit-learn.org/stable/user_guide.html) Erişim Tarihi Ağustos, 20, 2019.
- [17] S. Shekhar and H. Xiong, "Nearest Neighbor," *Encycl. GIS*, vol. I, pp. 771–771, 2008, doi: 10.1007/978-0-387-35973-1\_862.
- [18] Nello Cristianini and John Shawe-Taylor. *An introduction to Support Vector Machines and Other Kernel-based Learning Methods*. Cambridge University Press, New York, NY, 1999



## Pool Boiling Heat Transfer Properties of Water-Based Dilute Fe+ZnO Hybrid Nanofluid under Low Heat Flux Condition: A Numerical Study

Erdem ÇİFTÇİ<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>Gazi University Faculty of Technology, Department of Energy Systems Engineering, 06500, Teknikokullar-Yenimahalle, ANKARA

### Article Info

Research article  
Received: 26/01/2021  
Revision: 12/02/2021  
Accepted: 14/02/2021

### Makale Bilgisi

Araştırma makalesi  
Başvuru: 26/01/2021  
Düzeltilme: 12/02/2021  
Kabul: 14/02/2021

### Keywords

Computational Fluid  
Dynamics Simulation  
Hybrid Nanofluid  
Pool Boiling  
Volume-of-Fluid

### Anahtar Kelimeler

Hesaplamalı Akışkanlar  
Dinamiği Simülasyonu  
Hibrit Nanoakışkan  
Havuz Kaynama  
Akışkan Hacmi

### Abstract

Thermophysical properties of the working fluid of a fluid-driven heat transfer system is the key parameter in determination of heat transfer performance of the system they were used. The nanofluids, nanoparticles containing colloidal suspensions, have been extensively used for performance enhancement in many applications, however, the nanoparticles cannot have both high thermal conductivity and good stability simultaneously. To provide these characteristics together, hybrid utilization of nanoparticles has emerged. In this numerical study, pool boiling heat transfer characteristics of dilute Fe+ZnO/deionized water hybrid nanofluid were investigated under low heat flux condition (50 W). The hybrid nanofluid suspension at the volumetric rate of 0.5% and Fe+ZnO combination of (50:50) were taken into account. For numerical simulations, Computational Fluid Dynamics approach and Volume-of-Fluid multiphase model were employed. Vapor volume fractions and velocity vectors in fluid medium were obtained for deionized water, and the hybrid nanofluid aforementioned. The start-up of the bubbles and departures with time were investigated for each working fluid. Under the same conditions, the start-up time of the boiling for deionized water and dilute hybrid nanofluid were observed as 468. and 441. seconds, respectively. The numerical findings also displayed that hybrid nanofluids can be used for pool boiling implementations in order to provide improved heat transfer characteristics.

### Su Esaslı Seyreltik Fe+ZnO Hibrit Nanoakışkanının Düşük Isı Akısı Şartında Havuz Kaynama Isı Transferi Özellikleri: Sayısal Bir Çalışma

### Öz

Akışkanla çalışan bir ısı transfer sisteminin çalışma akışkanının termofiziksel özellikleri, kullanıldıkları sistemin ısı transfer performansının belirlenmesinde anahtar parametredir. Nanokışkanlar, nanoparçacıklar içeren koloidal süspansiyonlar, birçok uygulamada performans iyileştirme amacıyla yaygın olarak kullanılmıştır, ancak nanoparçacıklar aynı anda hem yüksek ısı iletkenlik hem de iyi derecede kararlılık sağlayamamaktadır. Bu özellikleri bir arada sağlamak için nanoparçacıkların hibrit kullanımı ortaya çıkmıştır. Bu sayısal çalışmada, seyreltik Fe + ZnO/saf su hibrit nanoakışkanın havuz kaynama ısı transfer özellikleri düşük ısı akısı koşulu (50 W) altında incelenmiştir. Analizlerde, %0,5 hacimsel oranda hibrit nanoakışkan süspansiyonu ve Fe+ZnO kombinasyonu (50:50) olarak dikkate alınmıştır. Sayısal simülasyonlar için Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği yaklaşımı ve Akışkan Hacmi çok fazlı modeli kullanılmıştır. Hem saf su hem de bahsi geçen hibrit nanoakışkan için akışkan ortamındaki buhar hacmi fraksiyonları ve hız vektörleri elde edilmiştir. Her bir çalışma akışkan için kabarcıklanma başlangıcı ve zamanla bunların yüzeyden ayrılışları incelenmiştir. Aynı şartlar altında saf suyun ve hibrit nanoakışkanın sırasıyla 468. ve 441. saniyelerde kaynamaya başladığı gözlemlenmiştir. Sayısal bulgular, hibrit nanoakışkanların iyileştirilmiş ısı transfer özellikleri sağlamak için havuz kaynama uygulamalarında kullanılabileceğini göstermiştir.

## 1. INTRODUCTION

Boiling occurs in many industrial processes and it provides a great number of heat fluxes because of higher values of convective heat transfer coefficients, compared to its counterparts. Even though higher heat transfer coefficients exist, the necessity of a bit difference between the temperatures of liquid and the heater in boiling processes can adversely affect the overall system performance (specifically in low heat flux conditions), which limits to obtain optimum heat transfer properties. To deal with this issue, the following two methods suggested by many researchers can be utilized: (1) modifying the surface-related properties (e.g. roughness) of the heater, and (2) enhancing the thermophysical properties (e.g. thermal conductivity) of the working fluid [1]. As stated by many researchers, an increase in the amount of generated bubbles in the liquid media accounts for the increases not just on nucleation sites, but also convective (boiling) heat transfer coefficient [2-4]. The unary and hybrid nanofluids have been utilized as working fluid in many thermal systems by many researchers and the common idea is that nanofluids, in general, enhance the thermophysical properties of the base fluid they were added, and hence, provides an efficient heat transfer. To illustrate; Gupta et al. numerically analyzed the pool boiling heat transfer characteristics of alumina-water nanofluid prepared under varying concentrations (0.001%, 0.005%, 0.01%, and 0.05% vol.). They stated that under constant heat flux, the heat transfer coefficient increased with increasing pressure, and an increment in nanoparticle concentration corresponded to an increase in boiling heat transfer coefficient, which was because of the increase in thermal conductivity of the nanofluid, compared to base fluid (water) [5]. Salehi and Hormozi numerically studied the nucleate pool boiling processes of water/silica nanofluid (0.1% vol.) and water considering the Euler multiphase approach. For the parameters associated with the bubbles generated during boiling, they employed the heat flux division model and verified their findings with empirical results. Moreover, they utilized some verified correlations to define nucleation sites, the density of bubbles, and bubble departure frequency, and remarked that the Hibiki-Ishii and Hattan-Hall correlations were the best ones. They also observed that the nanoparticles accumulated on the heater surface impacted the boiling heat transfer characteristics remarkably [6]. Via numerical simulations, Hussien et al. investigated the heat transfer upgrading of water-based alumina-graphene binary hybrid nanofluid that flows in a mini tube. They tested the working fluids they prepared in a variety of mini tube sizes (2.1 mm - 0.8 mm) and generated a homogeneous numerical model to specify the heat transfer performance of hybrid nanofluids. Their findings presented that alumina-water nanofluid usage increased the convection heat transfer characteristics significantly. Another significant point reported by the investigators was the maximum enhancement rate in heat transfer coefficient as up to 13.7% [7]. Aminfar et al. investigated the nucleate pool boiling heat transfer characteristics of nanofluids prepared by using alumina and silica nanoparticles via a series of CFD (Computational Fluid Dynamics) analyses. By utilizing two-phase and three-phase mixture models, they achieved the boiling curves, vapor fractions, velocity vectors, and streamlines at the end of the boiling process of the nanofluid. They also compared their results with experimental data and concluded that both results were in good agreement with each other, with deviations of 5.33% for alumina nanofluid, and 8.22% for silica nanofluid. Furthermore, they compared their data with the correlations validated in previous studies [8]. Rahimian et al. experimentally studied the pool boiling properties of the water-based silicon dioxide and titanium dioxide nanofluid suspensions on a cylindrical, stainless steel heater that is of 15 mm in diameter, 80 mm in length. They formed the boiling curves for each fluid by carrying out temperature measurements on the center of the heater. Their main observation was the accumulation of silica and titanium dioxide nanoparticles on the heater surface, which caused critical heat flux to increase at the rate of 120%. Furthermore, the film boiling heat transfer, which was another parameter they considered, also improved with the use of nanofluid suspensions [9]. Mohammed et al. carried out a numerical study for specifying the influences of concentration rate of nanoparticle, boiler temperature, and fluid velocity on the boiling and phase change characteristics by utilizing the CFD method considering the user-defined function they derived. They utilized, in their numerical calculations, four phases as liquid acetone, vapor acetone, liquid acetone/ZnBr<sub>2</sub> solution, and solid nanoparticles. They used ANSYS Fluent 15.0 software by activating the Volume-of-Fluid (VOF) multiphase model, and their results depicted that the vapor volume fraction and heat transfer coefficient increased with increasing nanoparticle concentration (0% - 1%) [10].

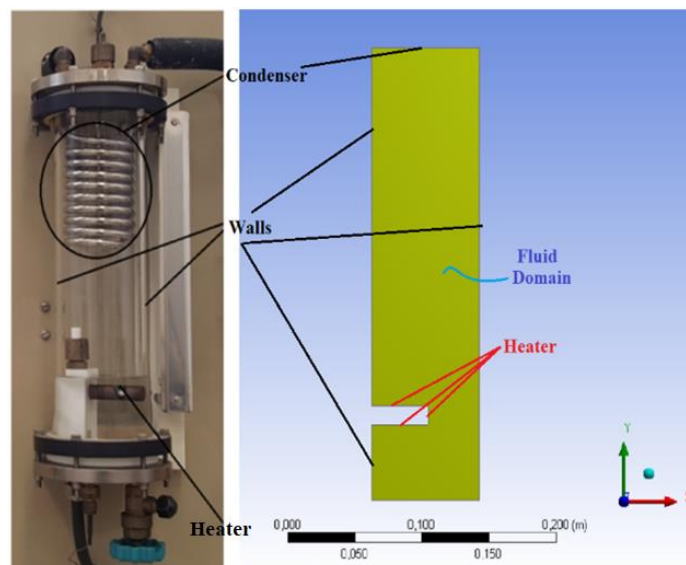
Numerical analysis is widely preferred, especially in the validation of the results obtained by experimental studies, and can be performed on almost all heat transfer and fluid flow problems via factual assumptions [11, 12]. In order to reduce the number of tests required in the solution of such problems, a range of analyses can be carried out. CFD approach, as known to all, is a numerical analysis method utilized to solve fluid flow, heat, and mass transfer problems. In this approach, detailed information regarding the solution domain (shear stress, pressure, etc.) can be obtained by solving a set of equations that define the fluid motion in a volume of interest [13]. It is also known that in numerical analysis, a set of equations that were set up by the user are solved on the solution domain. In this study, the equations of conservation of mass, conservation of energy, governing equation for diffusion in VOF (Volume-of-Fluid) multiphase flow model, and RNG  $k-\epsilon$  turbulent model were solved. The theoretical background for these equations can be found in the references [11] and [12].

In this numerical study, pool boiling heat transfer characteristics of dilute hybrid nanofluid at the volumetric concentration of 0.5% were investigated. The reason why choosing the combination of Fe and ZnO nanoparticles is to exploit the higher thermal conductivity properties of Fe nanoparticles and better stability characteristics of the ZnO nanoparticles simultaneously. The other thermophysical properties of each nanoparticle, which are relatively better than other kinds of materials, are also another reason for this selection. A cylindrical boiling cell in which a cylindrical heater was mounted was taken into account. The 2D model of the boiling cell was formed, a mesh structure on it was generated and then numerical analyses were performed in ANSYS Fluent software. The calculations were carried out for deionized water and hybrid nanofluid, and vapor volume fractions, velocity contours, and velocity vectors were obtained for each working fluid, and then these data were compared to each other. The usage of hybrid nanofluid suspension in thermal systems is increasing day by day, and thereby, it is thought that outcomes of this study will provide important information on pool boiling heat transfer characteristics of dilute Fe+ZnO/deionized water hybrid nanofluid under low heat flux conditions.

## 2. MATERIAL & METHOD

### 2.1. 2D Model & Mesh Generation

ANSYS Fluent was employed in numerical analysis. At first, the 2D pool boiling cell was formed in the Designmodeler section of the software by getting inspired from an experimental rig (Figure 1). Considering the real dimensions of the test rig, the generated 2D boiling cell model was of 0.08 m in width and 0.3 m in length. Besides, the heater was located 0.05 m above from the base and was of 0.042 m width and 0.0127 m length.

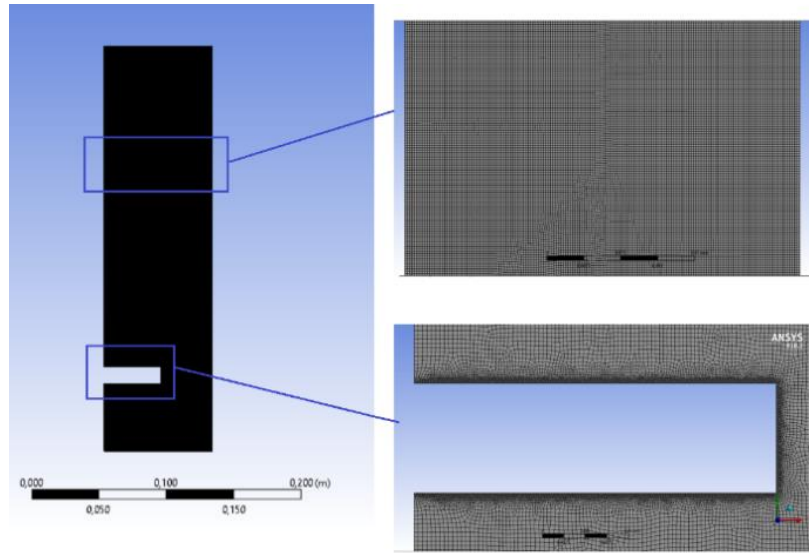


*Figure 1. The generated model in Designmodeler*

With the usage of this model, the boiling regimes of transition boiling and film boiling can be easily illustrated because it is too tough to see these kinds of boiling modes in an empirical study. Right after forming the model on ANSYS Designmodeler, the solution area (mesh structure) was constituted in the Mesh module taking into account the similar approach implemented in the reference study [14]. As illustrated in Figure 2, the mesh structure was comprised of quadrilateral elements. Moreover, in Table 1, some mesh metrics were presented.

**Table 1.** Some mesh metrics for the solution domain

Metrics	Value
Elements	105316
Nodes	106565
Skewness (avg.)	0.00256
Element quality (avg.)	0.9621
Orthogonal quality (avg.)	0.9938



**Figure 2.** The mesh model generated for numerical analysis

As stated earlier, the RNG  $k$ - $\epsilon$  turbulence model was employed in simulations because nanoparticles added into the distilled water increase the turbulence intensity of the fluid as a result of the interactions & collisions between the nanoparticles [11]. Moreover, the pool boiling regime contains non-uniform, perpetual movements of bubbles during the bubble generation and bubble extinction process. Thus, a turbulence model was utilized in numerical analysis to provide more actual results. RNG  $k$ - $\epsilon$  turbulence model yielded more accurate and reliable outcomes than the standard  $k$ - $\epsilon$  turbulence model for wider flow classification. Therefore, the RNG  $k$ - $\epsilon$  turbulence model was preferred in the solution.

## 2.2. Operating & Boundary Conditions

Nucleate pool boiling heat transfer characteristics of dilute Fe+ZnO/deionized water hybrid nanofluid were investigated under low heat flux condition. To make a comparison for illustration of the effects of hybrid nanoparticles on bubble-associated properties during pool boiling, the analysis was initially carried out for deionized water and dilute hybrid nanofluid. Such thermophysical properties of the nanofluid as viscosity, density, and thermal conductivity were manually entered into the Fluent software interface because they were unconventional fluids. All these thermophysical properties were theoretically calculated by using the correlations in literature [15]. The main assumption for hybrid nanofluid simulation was that the fluid was uniform. Besides, the evaporation-condensation mechanism was enabled for the demonstration of boiling regimes. The dilute hybrid nanofluid at the final volumetric rate of 0.5% was also taken into consideration in simulations. Since the time-dependent (transient) solution method was used, time step size and number of time steps were set as 0.0003 s and 2500, respectively.

The pressure-based solver was used for all analyses. The other operating & boundary conditions can be seen in Table 2. Besides, the thermophysical properties of each working fluid were presented in Table 3.

**Table 2.** The boundary & operating conditions employed in simulations

Model	Sub-model / Definition
Multiphase	Volume-of-Fluid (VOF), Implicit Body Force, Explicit Formulation
Energy	Enabled
Gravity	Enabled (y direction, $-9.81 \text{ m/s}^2$ )
Turbulence model	RNG k- $\epsilon$ , Enhanced Wall Treatment, Thermal Effects, Curvature Correction
Number of time steps	2500
Time step size	0.0003 s
Heat flux	50 W/m <sup>2</sup>
Heater material	Copper (smooth)

**Table 3.** Thermophysical properties of each working fluid utilized in the analysis

Working Fluid Type / Thermophysical Property	Deionized Water		Fe+ZnO/Deionized Water	
	Liquid	Vapor	Liquid	Vapor
Density (kg/m <sup>3</sup> )	998.2	0.5542	1025.54	0.6
Specific heat (j/kgK)	4182	4180	4058	2300
Thermal conductivity (W/mK)	0.6	0.0261	0.622	0.71
Viscosity (kg/ms)	0.001003	0.0000134	0.0014528	0.00065
Reference temperature (K)	298.15			

Since constant heat flux boundary condition (50 W/m<sup>2</sup>) was identified for the heater, its surface temperature was not considered. Besides, it is thought that heater surface temperature does not become constant at any time because of the continuous movement of working fluid. The thermophysical properties of each nanoparticle constituting the assumed hybrid nanofluid were also provided in Table 4.

**Table 4.** Thermophysical properties of Fe and ZnO nanoparticles

Physical / Thermophysical Properties	Fe (Iron)	ZnO (Zinc Oxide)
Molar mass (g/mol)	55.85	81.406
Melting point (K)	1809	2247
Density (g/cm <sup>3</sup> )	7.8	5.61
Thermal conductivity (W/mK)	76.2	50
Heat capacity (J/kgK)	440	495.21

### 2.3. Grid (mesh) Independency

The obtained results from numerical analysis are acceptable on condition that alterations in mesh properties do not affect the results, and hence a mesh independence study should also be performed in numerical simulations. In this study, for meshing independency, 5 various mesh (grid) structures varying from the coarse to the fine, each of which includes a different number of elements and nodes were generated, and the changes in vapor temperature around the condenser area were traced. In Table 5, details of the formed meshes, some mesh metrics of each, and vapor temperature values acquired from the simulations were presented. As far as all results were evaluated simultaneously, it was concluded that the most suitable mesh was the Mesh4, and thereby, all simulations were carried out using this mesh.



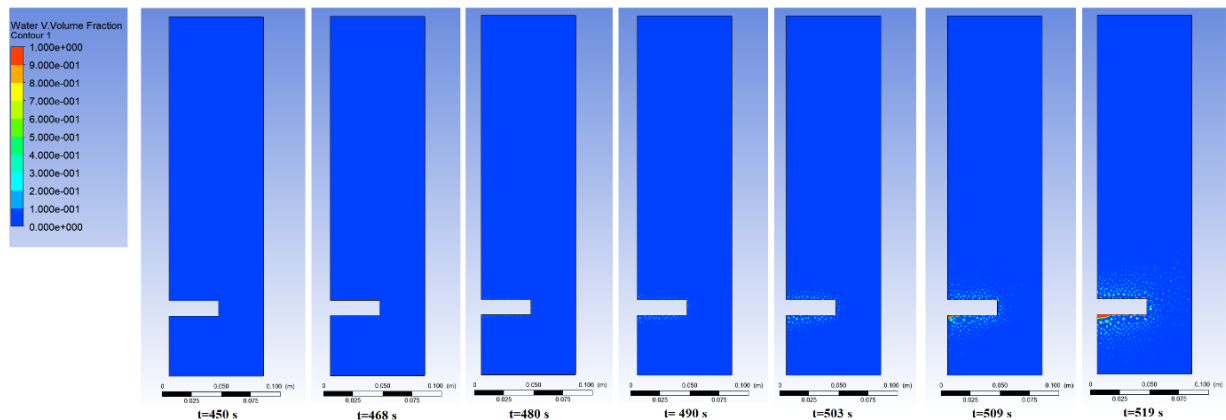
**Table 5.** The obtained results for mesh independency

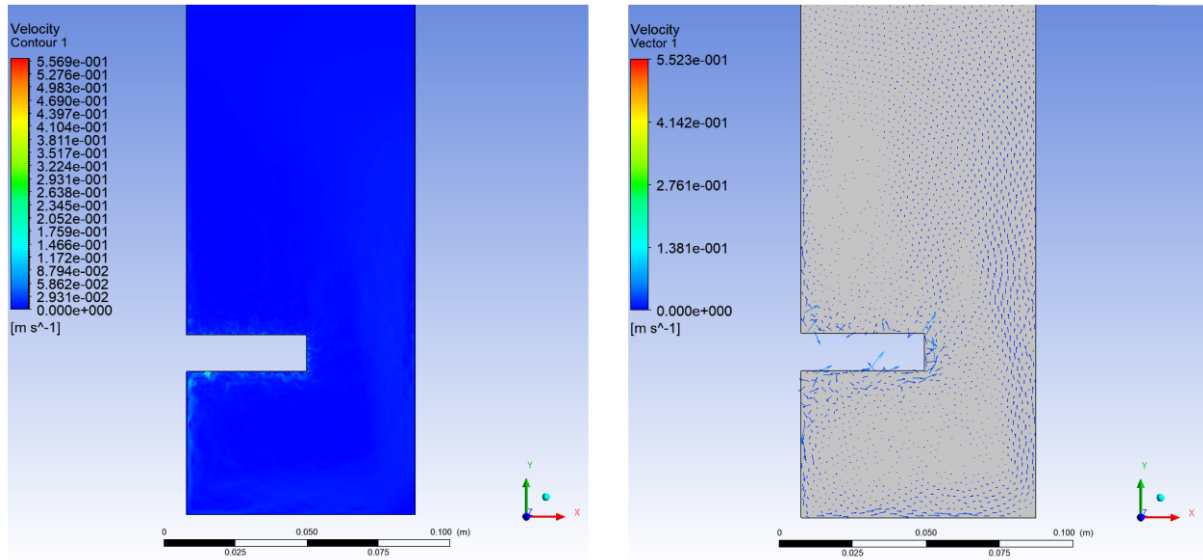
Mesh details	Mesh <sub>1</sub>	Mesh <sub>2</sub>	Mesh <sub>3</sub>	Mesh <sub>4</sub>	Mesh <sub>5</sub>
Elements	11550	23200	49300	105316	105990
Nodes	10827	25365	54027	106565	107137
Skewness (max.)	$5.3 \times 10^{-4}$	$3.4 \times 10^{-4}$	$6.1 \times 10^{-5}$	$4.8 \times 10^{-6}$	$6.2 \times 10^{-6}$
Element quality (avg.)	0.85	0.88	0.91	0.94	0.97
Vapor temperature (K)	381.32	381.86	381.15	381.15	381.17

### 3. RESULTS & DISCUSSION

As stated before, vapor volume fractions, velocity contour, and velocity vectors on the solution area were investigated. The vapor volume fractions illustrate the bubble characteristics such as bubble generation, bubble departure and so on, as well as the boiling regime. The obtained results for deionized water were provided in Figure 3 and Figure 4. Vapor volume fractions for different times were presented in Figure 3, whilst Figure 4 displayed both the velocity contour and the velocity vectors. The first observation in Figure 3 was that the bubble formations were started to be observed at nearly 468. seconds, when deionized water was used as working fluid. With increasing time, the number of bubble formation areas (i.e. bubble generation) was increasing gradually as a result of the increasing bulk temperature of the liquid. The increment in bulk liquid temperature also contributed to the departure of the bubbles, as can be seen specifically in the final phases of the analysis.

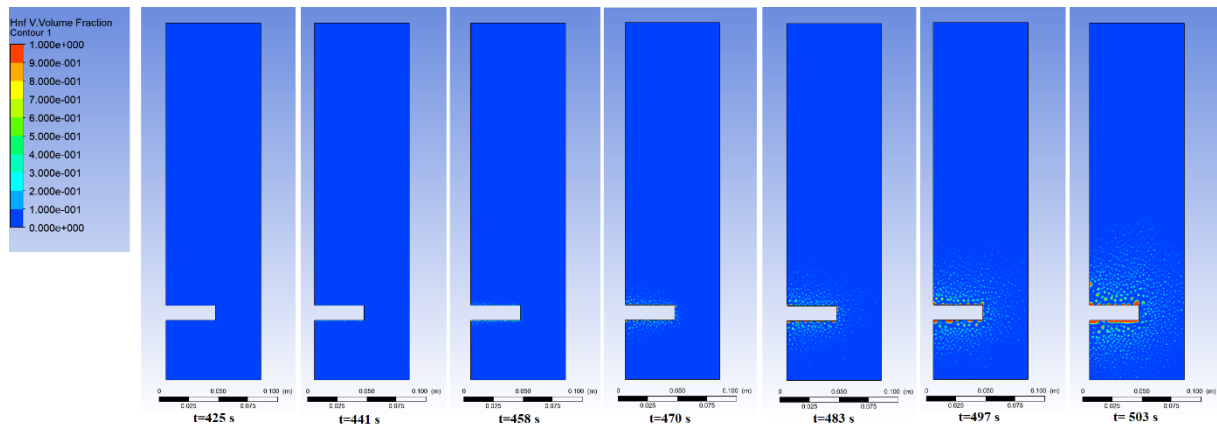
The velocity contours and velocity vectors in the solution domain gave an idea about the fluid motion during the nucleate pool boiling process. When deionized water was simulated, the fluid movement mainly concentrated around the heater, as expected, since increasing temperature difference between the heater and the liquid caused convection to occur. Besides, both the vectors and the contour obtained confirmed that the evaporation-condensation phenomenon was successfully identified in Fluent software.

**Figure 3.** Vapor volume fractions for deionized water



**Figure 4.** Velocity contour and velocity vectors for deionized water

When the analysis was conducted for dilute hybrid nanofluid of Fe+ZnO nanoparticles, the beginning time of the boiling was decreased to around 441 seconds, which was nearly 468 s for deionized water. This result depicted that hybrid nanoparticle addition inside the deionized water improved the heat transfer properties of the fluid.



**Figure 5.** Vapor volume fractions for Fe+ZnO/deionized water hybrid nanofluid

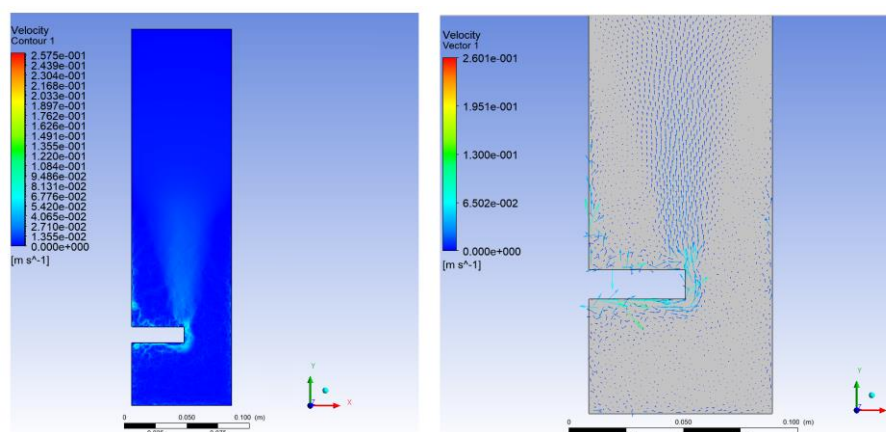
The nanoparticles increased the turbulence intensity within the fluid due to interactions as well as collisions in base fluid. Moreover, when the addition of nanoparticles, novel heat transfer areas were emerged inside the fluid, which facilitated the heat transfer both in fluid and between the heater and the fluid of interest. With increasing analysis time, this effect can be clearly seen.

Also, the transition boiling and film boiling regimes can be viewed at 483 seconds and 503 seconds analysis time, respectively. As a comparison, considering the 503. seconds, the number of bubble generation and departing bubbles were much more when dilute hybrid nanofluid was utilized, compared to deionized water, which indicated that heat transfer rate could be enhanced in nucleate pool boiling processes by the addition of Fe+ZnO nanoparticles (Figure 5). As another result, it can be said that the good stability of ZnO nanoparticles and high thermal conductivity of Fe nanoparticles upgraded the heat transfer performance.

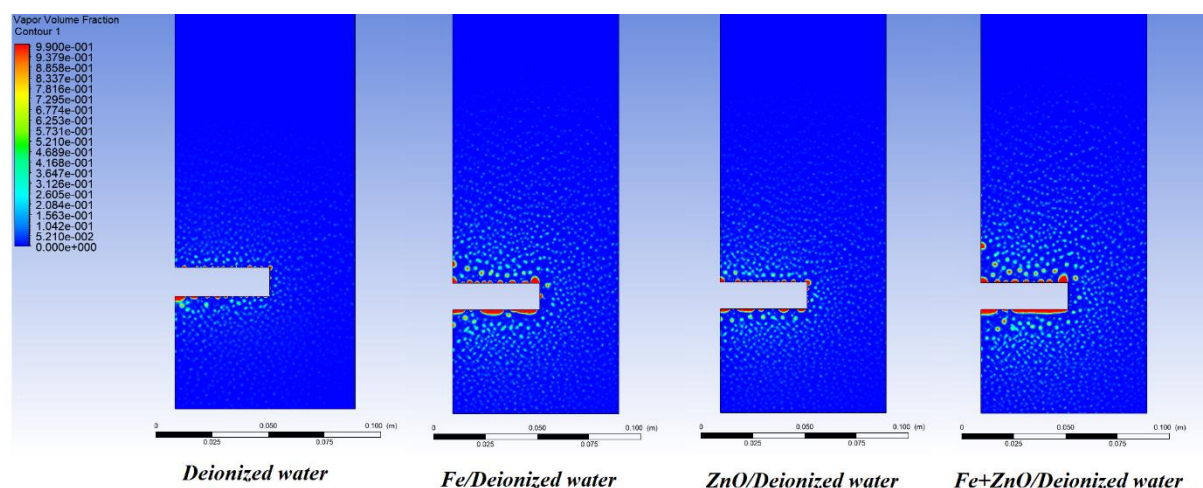
As to velocity-related results, when velocity vectors and velocity contour presented in Figure 6 for dilute hybrid nanofluid of Fe+ZnO nanoparticles were considered, it was observed that nanoparticle addition inside the base fluid also increased the mobility in the fluid of interest due to the increasing turbulence in fluid medium. Figure 6 also exhibited that the fluid flow mechanism in the fluid was altered by the

addition of nanoparticles. These changes in velocity contours are thought to be due to the onset time of boiling because this process took place before deionized water for dilute hybrid nanofluid.

To better understand how hybrid utilization of nanoparticles affect the boiling regime, the vapor volume fractions of single nanofluids, that is Fe/deionized water and ZnO/deionized water were provided in Figure 7 for 503. seconds of the boiling process. As it is clear that the number of nucleation sites, notably around the heater, is much more for hybrid nanofluid than the single type nanofluid, which denotes that a hybrid combination of nanoparticles increased the thermophysical properties of the nanofluid suspension remarkably.



**Figure 6.** Velocity contour and velocity vectors for Fe+ZnO/deionized water hybrid nanofluid

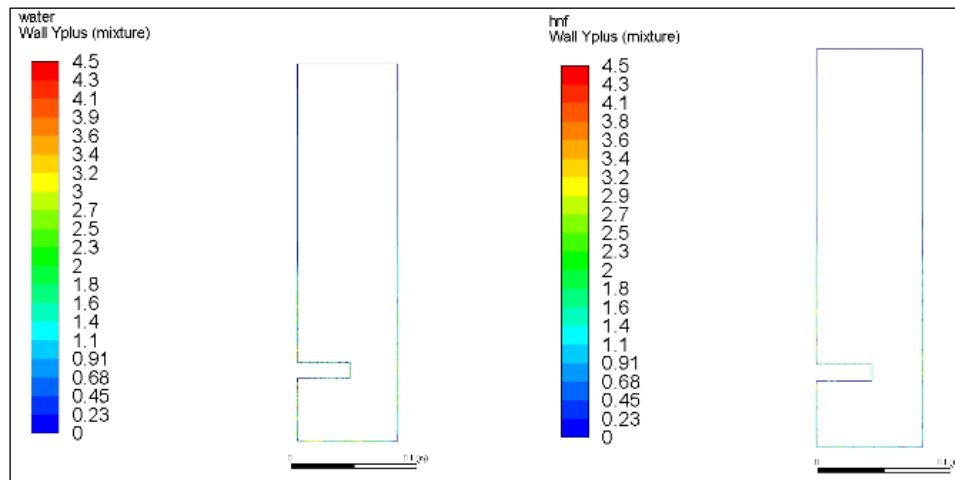


**Figure 7.** Comparison of the nucleation sites at 503. seconds of the process for each working fluid

Generally speaking, the hybrid nanoparticles also increase the number of possible nucleation sites in the medium. Besides, as known to all, the nanoparticles can flocculate and then precipitate during operation, and in most processes, it is not desired. However, in boiling processes, the nanoparticles accumulating on the heater surface form a layer, which also improves the heat transfer rate that corresponds to a decrease in boiling delay [6]. This layer can be viewed in the velocity contour of dilute hybrid nanofluid when the upper surface of the heater was examined in detail. In addition, an increase in turbulence has positively influenced the heat convection, which also corresponds to an increase in heat transfer-associated characteristics, specifically the heat transfer coefficient. The nanoparticles have higher thermal conductivity rates compared to liquid materials, which was one of the reasons for describing the nanofluids' upgraded thermal performance. Besides, the condensation of fluid at the top of the solution domain could not be observed in the analysis since the heating power is rather low; however, velocity

vectors illustrated that continuous evaporation-condensation occurs, which means that the CFD model was described truly and the operating & boundary conditions were applied successfully.

Compared to our findings with a similar study conducted by Gupta et al., almost the same conclusions were obtained; that is, for constant pressure and heat flux conditions, the heat transfer coefficient increased with the help of nanoparticles [5]. As another comparison, Mohammed et al. utilized both ANSYS Fluent 15.0 and Volume-of-Fluid (VOF) mixture multiphase flow model in their simulations for pool boiling and concluded that increasing nanoparticle concentration from 0% to 1% led vapor volume fraction and heat transfer coefficient to increase [10]. Besides, Sato and Niceno performed several numerical analyses for simulating both nucleate and film boiling regimes under atmospheric conditions and illustrated the temperature distributions. As a conclusion, they stated heat transfer properties could be estimated via CFD simulations [16].



**Figure 8.** Wall  $y^+$  values

The flow behaviour near the wall is generally a complicated phenomenon and in order to distinguish the different regions near the wall, the concept of wall  $y^+$  has been formulated. Therefore,  $y^+$  is a dimensionless quantity and is the distance from the wall measured in terms of viscous lengths. The calculated wall  $y^+$  values were given in Figure 8 as the contours. It can be seen that the calculated  $y^+$  values are in the acceptable range ( $y^+ < 5$ ).

#### 4. CONCLUSION

Nucleate pool boiling heat transfer characteristics of dilute, aqueous hybrid nanofluid containing Fe and ZnO nanoparticles at the Fe:ZnO combination of 50:50 and the final concentration of 0.5% (vol.) were numerically investigated in this study via ANSYS Fluent. A cylindrical heater-including boiling cell was modeled in DesignModeler module of the software, and then the mesh generation process was performed. For numerical comparison on low heat flux condition, the calculations were carried out for deionized water at first, and then hybrid nanofluid. The findings that cannot be obtained experimentally including volume fractions, velocity contours, and velocity vectors were illustrated for each working fluid. The fundamental outcomes of this study were as follows:

- The starting time of the boiling was recorded as 468. seconds for deionized water, and 441. seconds for dilute hybrid nanofluid, which illustrated that dilute hybrid nanofluid provided more efficient heat transfer between the heater and the fluid than deionized water under low heat flux condition.
- The velocity contours and velocity vectors showed the movement of flow around the heater from the heater to the condenser area.

- Transition and film boiling processes which cannot be viewed in operation or attained from any experiment were illustrated by numerical analysis.
- It was shown that dilute hybrid nanofluids can be used in pool boiling applications even in low heat flux conditions.




## REFERENCES

- [1] Ham J., Kim H., Shin Y., Cho, H. (2017). Experimental investigation of pool boiling characteristics in Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanofluid according to surface roughness and concentration. *International Journal of Thermal Sciences*, 114, 86-97.
- [2] You S.M., Kim J.H., Kim K.H. (2003). Effect of nanoparticles on critical heat flux of water in pool boiling heat transfer. *Applied Physics Letters*, 83, 374-3376.
- [3] Park H., Lee S.J., Jung S.Y. (2019). Effect of nanofluid formation methods on behaviors of boiling bubbles. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 135, 1312-1318.
- [4] Rostamzadeh A., Jafarpur K., Rad E.G. (2016). Numerical investigation of pool nucleate boiling in nanofluid with lattice boltzmann method. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 54, 811-825.
- [5] Gupta R.R., Bhambi S., Agarwal, V.K. (2019). CFD modeling for nucleate pool boiling of nanofluids. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 75, 402-412.
- [6] Salehi H., Hormozi F. (2019). Prediction of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-water nanofluids pool boiling heat transfer coefficient at low heat fluxes by using response surface methodology. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 137, 1069-1082.
- [7] Hussien A.A., Yusop N.M., Al-Nimr M.A., Abdullah M.Z., Janvekar A.A., Elnaggar M.H. (2019). Numerical study of heat transfer enhancement using Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-graphene/ water hybrid nanofluid flow in mini tubes. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions A, Science*, 43, 1989-2000.
- [8] Aminfar H., Mohammadpourfard M., Sahraro M. (2012). Numerical simulation of nucleate pool boiling on the horizontal surface for nano-fluid using wall heat flux partitioning method. *Computers & Fluids*, 66, 29-38.
- [9] Rahimian A., Kazeminejad H., Khalafi H., Mirvakili S. M., Akhavan A. (2020). An experimental study of the steel cylinder quenching in water-based nanofluids. *International Journal of Engineering Transactions A: Basics*, 33, 28-33.
- [10] Mohammed H.I., Giddings D., Walker, G.S. (2018). CFD simulation of a concentrated salt nanofluid flow boiling in a rectangular tube. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 125, 218-228.
- [11] Çiftçi E., Sözen A. (2020). A numerical study on performance improvement in boiling heat transfer via dichloromethane-based nanofluid utilization. *Politeknik Dergisi*, 23(3), 849-857.
- [12] Çiftçi E., Sözen A. (2021). Heat transfer enhancement in pool boiling & condensation using h-BN/DCM and SiO<sub>2</sub>/DCM nanofluids: experimental & numerical comparison. *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, 31(1), 26-52.
- [13] Afshari F., Zavaragh H.G., Di Nicola G. (2018). Numerical analysis of ball-type turbulators in tube heat exchangers with computational fluid dynamic simulations. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 16, 3771-3780.

- [14] Spiegel M., Redel T., Zhang Y.J., Struffert T., Hornegger J., Grossman R.G., Karmonik C. (2011). Tetrahedral vs. polyhedral mesh size evaluation on flow velocity and wall shear stress for cerebral hemodynamic simulation. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, 14, 9-22.
- [15] Çiftçi E. (2020). Investigation of the thermophysical properties of AlN+ZnO/deionized water hybrid nanofluid. *International Journal of Energy Studies*, 5, 59-67.
- [16] Sato Y., Niceno, B. (2018). Pool boiling simulation using an interface tracking method: from nucleate boiling to film boiling regime through critical heat flux. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 125, 876-890.



## Analysis the Effects of Electric Vehicles on Distribution Networks with Simulations Based on Probabilistic Methods

Mehmet KOÇ<sup>1\*</sup> , Osman Bülent TÖR<sup>2</sup> , Şevki DEMİRBAŞ<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 06500, Yenimahalle, ANKARA

<sup>2</sup>EPRA Elektrik Enerji İnş. Ve Tic. Ltd. Şti, 06800, Çankaya, ANKARA

### Abstract

As the number of electric vehicles (EV) increases, technical concerns deal with additional load introduced by charging of EVs connected to power distribution networks, are being discussed in the literature. Smart mechanisms such as incentivizing charging of EV's to periods at minimum loading hours are being considered to mitigate additional loading effect of EVs on power grids. In this study, such effects and smart solutions are investigated through quantitative analyses. For this purpose, impact on EVs are simulated for a set of pilot distribution grids in Turkey. First, reference network models of the pilot regions, which do not include any EV load, are developed for the target year 2030. Then EV charging points in different technologies (slow and fast charging) are added to reference network models under two main scenarios; home charging support (HCS) and public charging support (PCS). Arrival times of EVs to the charging stations and state-of-charge (SOC) of EVs at arrival time are modelled with a stochastic approach. The effects of EVs on the pilot grids are quantified in terms of annual capacity factor (%), overloading (%) of the branches (transformers and lines), and voltage drop (%) at the substations.

### Article Info

Research article  
Received: 05/11/2020  
Revision: 16/02/2021  
Accepted: 17/02/2021

### Makale Bilgisi

Araştırma makalesi  
Başvuru: 05/11/2020  
Düzeltilme: 16/02/2021  
Kabul: 17/02/2021

### Keywords

Electric Vehicles  
Distribution Networks  
Stochastic Approach  
Charging Stations

### Anahtar Kelimeler

Elektrikli Araçlar  
Dağıtım Şebekesi  
Stokastik Yaklaşım  
Şarj İstasyonları

## Elektrikli Araçların Dağıtım Şebekelerine Etkilerinin Olasılıksal Yöntemlere Dayalı Simülasyonlar ile Analizi

### Öz

Elektrikli araçların (EA) sayısı arttıkça, EA'ların şarj yükünün güç dağıtım şebekelerine ilave yük getireceği ve sorunlar yaşanabileceği güncel tartışılan bir konudur. EA'ların şarj maliyetini şebekenin yükünün düşük olduğu saatlere kaydırmaya yönelik akıllı mekanizmalar bir çözüm olarak değerlendirilmektedir. Bu çalışmada, EA'ların şebekeye entegrasyonu sonrası bu tür ihtiyaçlar ve çözümler analiz edilmiştir. Bu amaçla, 2030 yılında Türkiye'de sayıları önemli ölçüde artması beklenen EA'ların şebekeye etkilerine yönelik olarak, pilot bir dağıtım şebekesinde, senaryo bazlı simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. EA'ların pilot dağıtım şebekesi üzerindeki etkilerini değerlendirmek için, ilk önce hedef yıl olan 2030 için bir referans şebeke modeli (EA şarj yükü olmayan) geliştirilmiştir. Daha sonra, farklı teknolojilerdeki (yavaş ve hızlı şarj) EA şarj noktaları, yoğunlukla evlerde şarj ve yoğunlukla işyerlerinde ve kamusal alanlarda şarj senaryoları için ayrı ayrı olmak üzere, bu referans şebeke modeline ilave edilmiştir. Rastgele değişkenler olan EA'ların şarj istasyonlarına varış zamanı ve varış zamanında şarj durumu (SOC) stokastik yaklaşımlar ile modellenmiştir. EA'ların şebekeye entegrasyonunun etkileri, ekipmanların (transformatör ve hatlar) yıllık doluluk oranı (%), aşırı yüklenme (%) ve aşırı gerilim düşümü (%) açılarından incelenmiştir.

## 1. INTRODUCTION

Increasing energy demand and environmental effects have made it mandatory to use alternative energy sources in electricity generation and to prefer high energy efficient electrical devices in consumption. One of the most important sources of environmental problems is the use of fossil fuel vehicles, especially in the transportation sector, increasing greenhouse gases and noise pollution. Therefore, there is a tendency in the transport sector to switch to electric vehicles (EV) instead of vehicles using fossil fuels. These

vehicles are basically divided into three in technological point of view; 1) Fully electric vehicles (FEV); 2) Hybrid vehicles (where HV, fossil fuel and electrical energy are used together and cannot be charged externally); and 3) Plug-in hybrid vehicles (PIHV, internal and external rechargeable hybrid vehicles).

The widespread use of both PIHV's and FEV's will contribute to the elimination of environmental impacts such as reducing greenhouse gas and noise pollution, as well as reducing dependence on fossil fuels. In addition, in the near future, the use of powerful batteries of new generation electric vehicles as a short-term power source for the grid is also considered as an expected practice [1-2]. On the other hand, since EV's will bring additional load to the grid during charging, factors such as the adequacy of the generation resources in the grid, especially the capacity of the electricity distribution grids and power quality should be taken into consideration in parallel with the increase in the number of EV's [3-4].

Various studies examining the effect of EV's on the electricity grid are available in the literature. The changes that occur in the grid equipment are examined as a result of integration of the EV load to the grid with load flow analysis. As a result of the analyzes made in different scenarios, it has been observed that the technical constraints are not exceeded in the equipment [5-6]. The effect of the EV load on the grid losses has also been examined and it has been observed that the EV's have a negative effect on the grid loss, especially in uncontrolled charging situations [7]. EV's and charging stations contain power electronic equipment. Therefore, EV's and charging stations have an effect on the power quality on the grid [8-10]. The effect of EV's on the grid exists not only technically, but also socially, economically and humanly [11-13].

There are several studies examining the effect of EV on Turkey's low voltage and medium voltage grid. As a result of these studies, it has been determined that EV load will cause a small number of restriction violations in grid equipment as a result of existing grid expansion and grid integration and the importance of considering EV. The load during network planning in the coming years has been emphasized in terms of network management. [14-15].

In this study, in projection year 2030, a significant amount of the electricity distribution grid in Turkey to be integrated into the grid of the expected effects of EV were examined. For this purpose, the EV's on a distribution network with metropolitan characteristics determined as a plot; i) Electrical equipment loading (such as line and transformer) and ii) and its effects in terms of voltage drop in the substations have been investigated by computer simulations.

The most important contribution of this study to the literature is the use of probabilistic techniques while determining the daily charge profile of EV's and the performance of grid impact analysis in a real electricity distribution grid using these daily charge profiles. In addition, smart charging methods for minimizing the additional load of the EA's load to the network have been examined in two different main scenarios: i) Scenario where home charging is more intense (home charging support); ii) Scenario with more intense charging in public (public charging support).

Second part of the study is about the technology of EV, and the general information on Turkey's electricity grid will be given in Chapter 3 as well. In Chapter 4, the previous studies about the effect of EV's on the grid, the analyzes and results made within the scope of this study are explained. Finally, results obtained from the study is concluded in Chapter 5.

## **2. OVERVIEW OF ELECTRIC VEHICLES**

The first emergence of electric vehicles in history dates back to the 19th century. In the 19th century, EV was also manufactured and sold together with internal combustion engine vehicles. In the 20th century, the faster development of internal combustion engine technology and the cheaper fossil fuels led to a decrease about the concern to EV [16]. In the 2000s, due to the decreasing trend of fossil fuels and increasing environmental pollution, environmentally friendly EV's have come to the fore again. First, hybrid electric vehicles started to be developed and produced [17]. With the development of battery technology, full electric vehicles have become popular and prominent in the market with plug-in hybrid electric vehicles.



## 2.1. Electric Vehicle Technologies

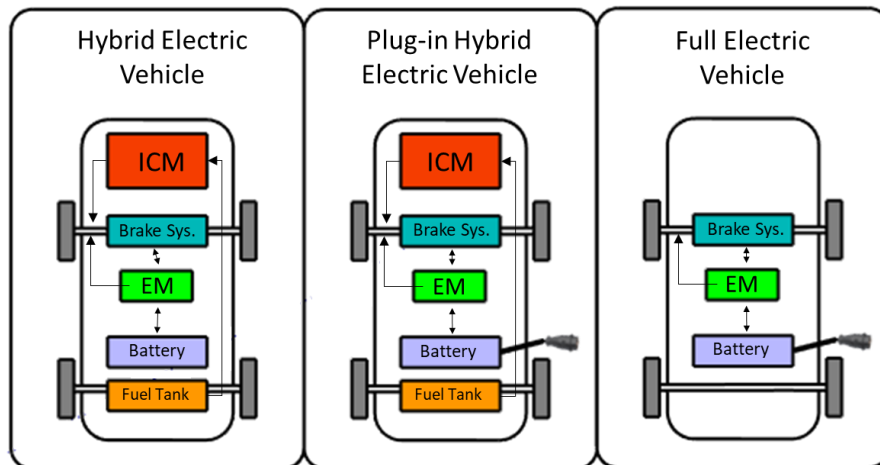
Electric vehicles used today are defined in 3 main types: hybrid electric vehicles (HEV), plug-in hybrid electric vehicles (PIEV) and full electric vehicles (FEV). The differences between the types are determined by the characteristics of the motors that provide motion in general, the batteries and the charging method. Engine structure and battery charging methods according to vehicle types are given in Table 1, and the hardware structure of the vehicles is given in Figure 1.

**Table 1.** Types of Electric vehicles

<i>EV Technology</i>	<i>Battery Charging Method</i>	<i>Motor Type</i>
<i>FEV</i>	<i>External</i>	<i>Electric</i>
<i>HEV</i>	<i>Internal</i>	<i>Electric + Internal combustion</i>
<i>PIEV</i>	<i>Internal and External</i>	<i>Electric + Internal combustion</i>

HEV's are vehicles that are widely used commercially today. In these vehicles, fossil fuel and electrical energy are used to obtain the desired power. While fossil fuel is used for internal combustion engine supply, the electric motor in the system is powered by the battery in the vehicle. In these vehicles, when both engines work as hybrid, the internal combustion engine is activated at high speeds and in situations where high power is required, while the electric motor is active at the moment of take-off and at low speeds. . Since the electric machine has the feature of working both as a generator and as a motor, it provides braking on the one hand by gaining energy during braking, and on the other hand acts as a generator to charge the battery. In this way, the batteries are charged during braking. In such vehicles, the batteries cannot be charged externally. Although the electric motor increases the acceleration power of the vehicle, it is activated when the vehicle is in stop-and-go, and provides up to 25% fuel savings [18].

PIEV and HEV's are similar in structure. The difference of such vehicles from HEV's is that the battery in the vehicle can be charged externally. The battery can be charged both with regenerative braking technology while driving and from the electricity grid when the vehicle is parked. In terms of efficiency, PIEV's are more efficient than HEV's because the limited use of the internal combustion engine and the combined operation of the equipment increase efficiency [19].



**Figure 1.** Structure of electric vehicle types

There are no internal combustion engines in FEV's, so the traction power of the vehicle is only provided by electric motors. For this reason, only batteries are used instead of fossil fuel as an energy source. The vehicle provides the power it needs from these batteries. The batteries should be charged at regular intervals, depending on the type of the battery in the vehicle, the conditions of use and the range of the vehicle. While the charging process of FEV can be carried out at charging stations placed in areas such as homes, workplaces, shopping malls, charging stations for charging EV's have also started to be

developed. FEV's are the type of electric vehicle with the lowest greenhouse gas emission compared to electric vehicles with internal combustion engines. In addition, it can produce more torque at low speeds than internal combustion engines since it only has a battery and an electric motor [8]. Today, FEV types and numbers are increasing day by day in the automotive market. With the developing technology, mostly advanced lithium ion batteries are used in vehicle batteries today.

## **2.2. Electric Vehicles Charging Stations**

EV charging stations are structures that enable the charging of EV's that can be charged from external sources. Charging stations take the power from the electricity distribution grid in order to charge the EV's. EV's can receive electric current from charging stations in the form of alternating current (AC) or direct current (DC), depending on their structure.

EV's that receive electric current as AC have AC-DC rectifier within their body. The electric current passes through the alternating current rectifier and turns into direct current and the battery is charged with direct current. These charging stations are called AC level charging stations. AC level charging stations come in 2 types, Level 1 (AC1) and Level 2 (AC2). The power of Level 1 charging stations is 2-3 kW, while the power of Level 2 charging stations is 20-30 kW. DC charging stations contain AC-DC rectifiers and charge the batteries by converting the alternating current received from the electricity grid into direct current. These stations have a power of 40-100 kW. DC charging stations are used for fast charging and can charge the battery in an average duration of 30 minutes. AC charging stations are generally used in homes and businesses because they charge more slowly than DC charging stations. DC charging stations are used in public places such as highways and shopping malls [20].

Since the number of EV's charged from the electricity grid is low today, the effect of these loads on the grid remains limited. However, considering the increase in the number of EV's in the near future, the effect of these loads on the grid should be taken into account. Grid structure and ports of EV are of great importance, as well as the load profile they draw in the analysis of the impact of EV on the grid.

## **3. ELECTRIC NETWORKS AND NETWORK STRUCTURE IN TURKEY**

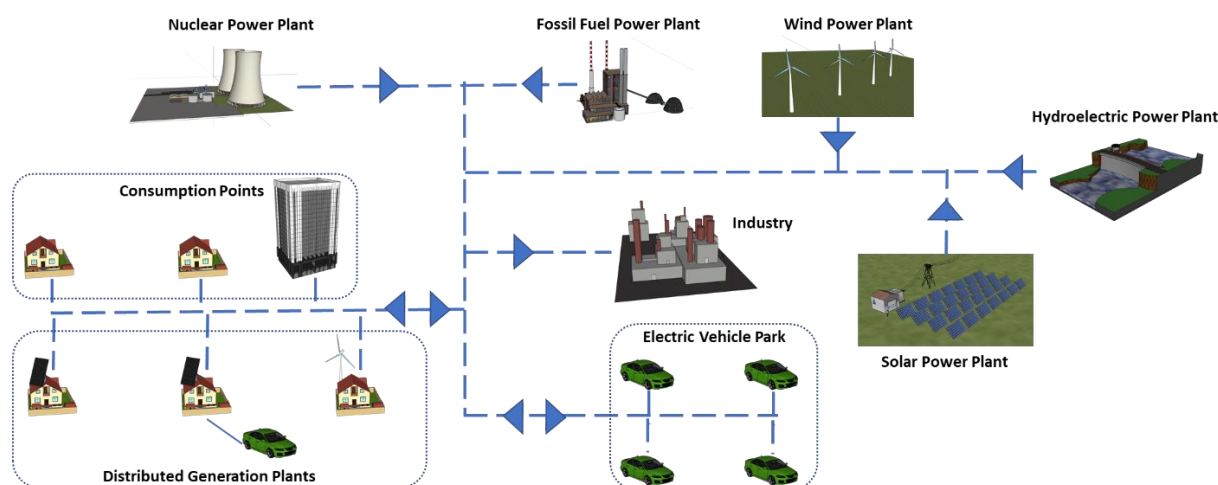
Electricity network is a system that includes production and consumption points with transmission and distribution systems. With this system, the electrical energy generated in generation plants is delivered to consumers. In the first electricity networks, generation facilities were being built in locations close to the consumption point. With the increasing use of electricity in the following time, the need to transmit electrical energy to further distances than production points arise. In addition, as the amount of electrical energy needed increased, the number of production facilities increased. With the increase in both production and consumption facilities, distribution and transmission systems have also expanded [21]. Due to the increase in the number of equipment included in the electricity network day by day, the network becomes more complex and its management is also difficult. For this reason, electricity networks are divided into production, transmission and distribution sections.

The generation system is the system that transfers the electrical energy generated from renewable and non-renewable energy sources to the transmission or distribution system in generation plants. The transmission system provides the transmission of high voltage level electrical energy from production facilities to consumption areas. The distribution network is the system that transmits the electrical energy coming from the transmission level to the end user at medium and low voltage levels.

Electric transmission level in Turkey is structured in 380 kV and 154 kV voltage levels. In the medium voltage level of the electricity distribution network in Turkey, 33 kV voltage are used mostly and 6.3 kV and 15.8 kV voltages are used rarely. Energy distribution for low voltage level customers is carried out at 0.4 kV voltage level. Therefore, electrical energy at medium voltage level is reduced to low voltage level by means of distribution transformers.

The main rule in distribution networks is that the end users are fed technically, economically and ergonomically. For this reason, branched and ring network systems are used in the Turkey's electricity distribution network. Branched networks are networks where the supply is made from a single source and

there is no alternative supply. Ring networks, on the other hand, are networks that have more than one source and therefore have alternative feeds. In branched networks, the installation cost is less and fault detection is easier than ring networks. However, ring networks are more advantageous than branched networks in terms of reliability. In the distribution network of Turkey, the network that feeds the city center and important port is operated as a ring network load. Networks that feed rural networks and points with low load are generally operated as branched networks.



*Figure 2. Example of bidirectional electric grid*

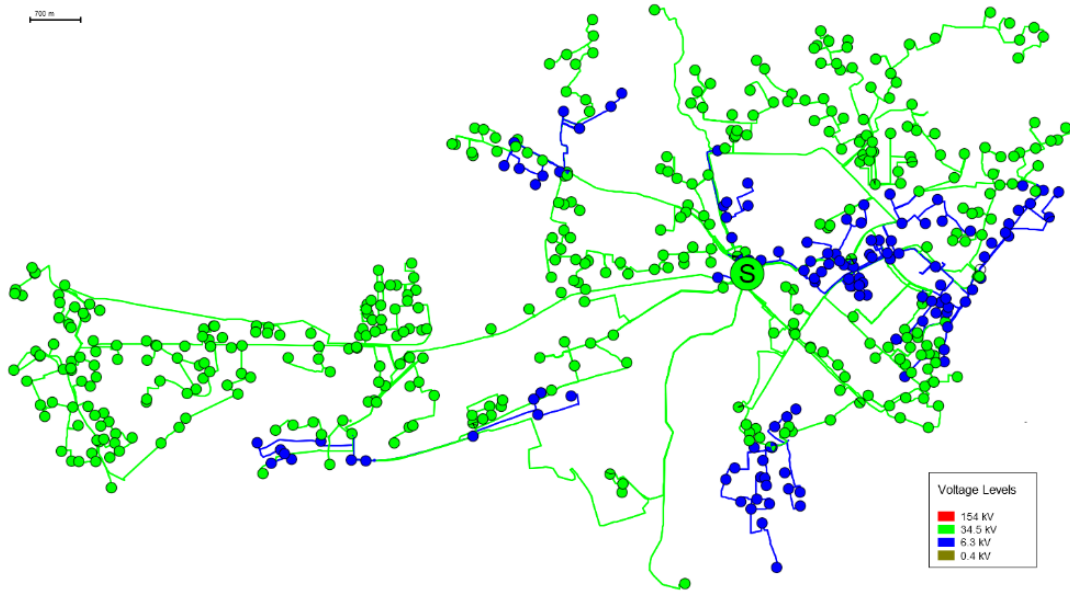
Electric vehicle charging stations are connected to the distribution network from many different points, and as the number of charging stations increases, the number of different points connected will also increase. The electric vehicle load that can be integrated into the network can be estimated with the help of probabilistic functions according to the characteristics of the vehicles and their usage conditions. However, due to the ability of electric vehicles to use different charging stations, the point at which they will be integrated into the grid shows flexibility. This increases the need to examine the impact of electric vehicles, which can be manufacturers and consumers, on the Turkey electricity distribution network.

#### 4. EFFECTS OF ELECTRIC VEHICLES ON DISTRIBUTION NETWORK

As part of this study, the technical impact of electric vehicles on the distribution network in 2030 was examined in the region fed by Akköprü substation in Ankara city center, Turkey. According to the projection, it is expected that by 2030, the population of Turkey will be 93 million and the number of personal vehicles will be 27.9 million [15]. Considering the policy of the government of the Republic of Turkey, the domestic electric vehicle is expected to go on sale in 2023. Therefore, the increase in the rate of electric vehicles in traffic will accelerate by 2023. Considering these developments, in this study, it has been assumed that the ratio of electric vehicles in all vehicles in 2030 will be 30% in the medium growth scenario and 65% in the high growth scenario.

The pilot region network model is modeled on DIgSILENT PowerFactory power system analysis software. In the network model, the power profiles taken from the field are processed on the feeders. Peak days were determined as a result of the analyzes made with the processed profiles and the analyzes were carried out on the determined day. The analyzed area is fed from two different HV/MV power transformers from the same transformer center. As of 2019, the number of MV/LV distribution transformers available in the pilot area is 599, MV line length is 340 km, and the LV line length is 1405 km. From 2019 to 2030, it has been assumed that the annual load increase will be an average of 5% [22]. Necessary network investments were added to the network model to prevent technical constraints in the network after load increase.

Criteria considered for technical constraints are: i) overloading on network lines; ii) overvoltage drop at the consumer points and iii) N-1 reliability criteria in the primary distribution network in the plot regions. Parallel line and transformer investments are modeled on existing lines and transformers where these criteria cannot be met. In 2030, it is predicted that there will be 665 MV/LV distribution transformers, 352 km MV line and 1464 km LV line with the method explained in the plot network.



**Figure 3.** Single line diagram of pilot region

In the study, the margin of the total number of electric vehicles expected to fall into the traffic of the pilot region studied in Turkey calculated firstly. In this calculation, the following statistical data of the city of Ankara and the plot region are used: i) The ratio of the gross domestic product of the city of Ankara; ii) Growth coefficient; iii) Education level coefficient; iv) The pilot of a high-voltage transformer that feeds the center of Turkey's total installed capacity to a total installed capacity of high-voltage transformer ratio (1) [15]. With this approach, the total number of electric vehicles calculated for the pilot region in 2030, the total number of EV charging stations and different charging technologies are given in Table 2.

$$EV_{PR} = EV_T * TMK_{PR} * GDP_A * DC_A * EC_A \quad 1$$

$EV_{PR}$ : Pilot region number of electric vehicles

$EV_T$ : Total number of electric vehicles (2030)

$TMK_{PR}$ : Ratio of pilot regional substation installed capacity to total substation installed capacity in Turkey (2030)

$GDP_A$ : Ratio of the gross domestic product of the city in which the pilot region is located to the total gross domestic product of the country (2014) [23]

$DC_A$ : Development coefficient of the city where the pilot region is located [24]

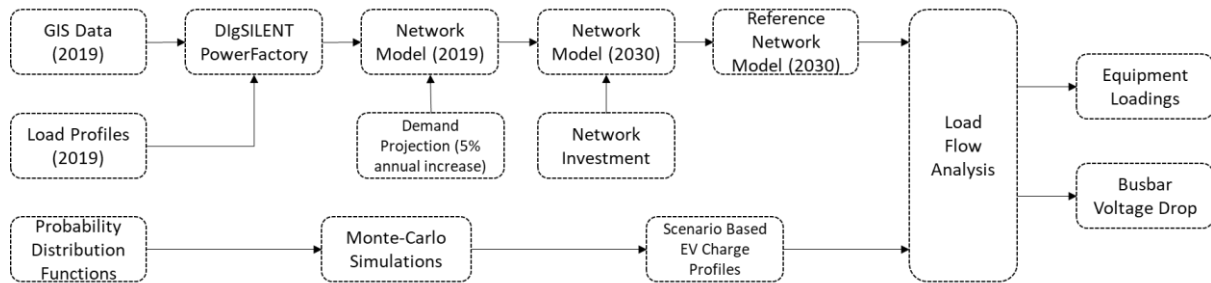
$EC_A$ : Coefficient of education level of the city where the pilot region is located [25]

**Table 2.** Pilot region EV number of charging stations and charging technologies

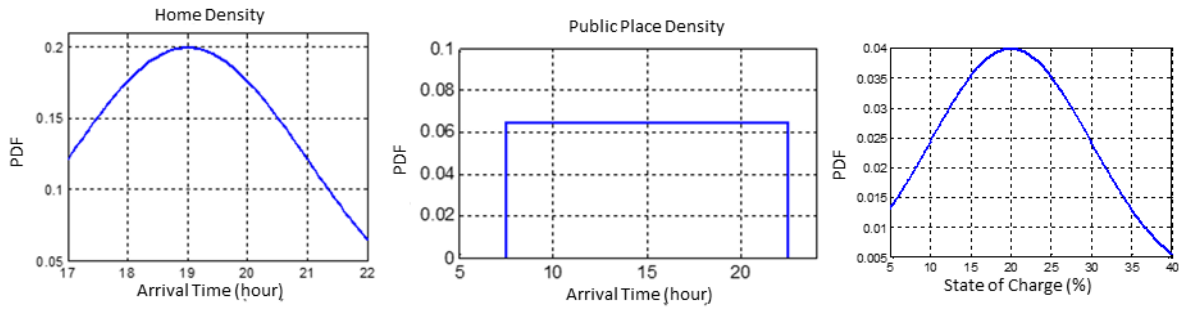
<b>Charging Status</b>	<b>Home Charging Support</b>	<b>Public Charging Support</b>
AC1 – Home	683	683
AC2 – Home	1595	1595
AC2 – Workplace	456	456
AC2 – Public place	410	820
DC3 – Public place	46	91
<b>Total</b>	<b>3190</b>	<b>3645</b>

#### 4.1. Method

The flow chart of the method followed in the study is given in Figure 4. Analyzes were carried out with DiGSILENT PowerFactory network analysis software. In this context, as can be seen in the flow chart, firstly the network geographic information system (GIS) data of the plot region was transferred to the network analysis software and the 2019 (current) reference network model was created. Then the 2019 annual loading profiles of the transformers in the plot region were escalated, and the 2030 load profiles were obtained. For this purpose, an average annual demand increase of 5% is projected (excluding EV charging load). While determining the additional network investments needed after this increase in demand, the previous 5 and 10-year demand increase and network investment amounts and 2019 transformer occupancy rates (annual capacity factor) were taken as reference in the plot region. Thus, excessive low or high grid investment modeling is prevented in the 2030 reference grid model without EV charging load. Finally, the EV vehicle charge load was modeled on the 2030 reference grid model in different scenarios and the effects of EV's on the network were analyzed.

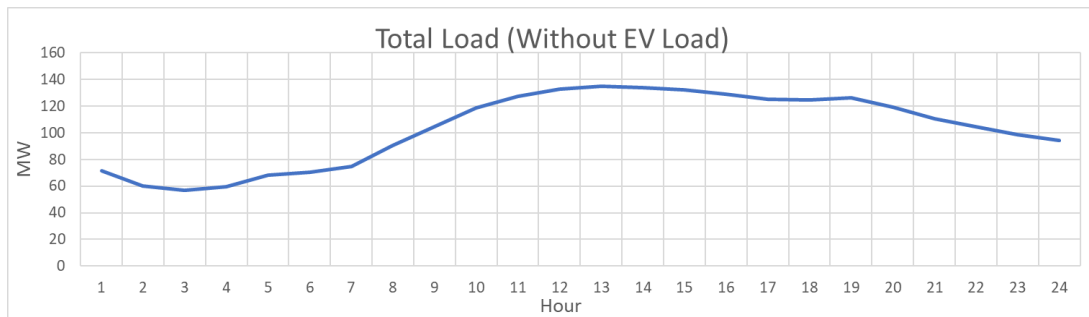
**Figure 4.** Flow chart of method

Monte-Carlo simulations were used to determine the daily charge profile of electric vehicles [26]. By using the charging times of electric vehicles during the day and their arrival times at charging stations as probabilistic inputs, a possible daily charge profile has been obtained. One million different charge profiles were created by Monte Carlo simulations. Among these, five representative charge profile probability distances have been determined using the scenario reduction approach [27]. One million scenarios are clustered in 5 categories according to their probability values. Later, the most representative electric vehicle charging model was selected in each category. Examples are given in Figure 5 for the probabilistic distribution functions (PDF) of the charge based on AC2 and DC technology and the current state of charge (SOC) modeling of the vehicles in the scenario where charging at home is intense. Charge in public place is modeled as uniform to daytime hours, while charging profile at home is modeled as evening and normal distribution.



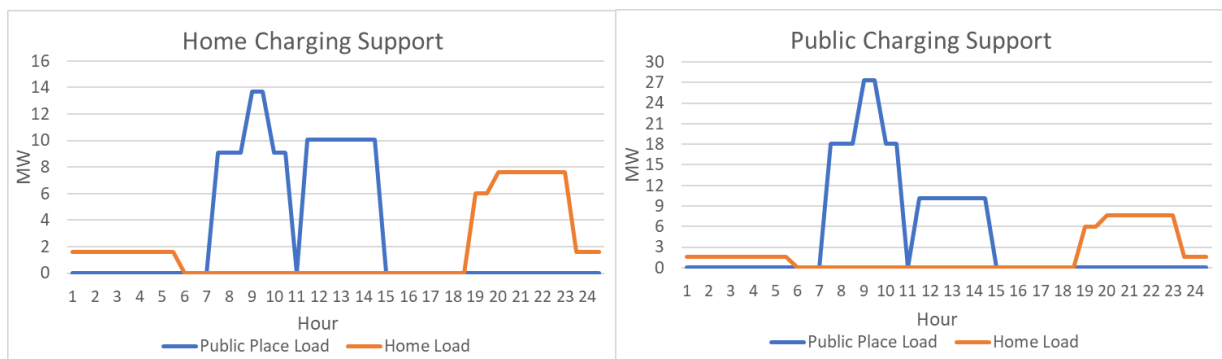
**Figure 5.** Possible daily EV load estimation method

Electric vehicle loads; connected to the LV networks of distribution transformers for home charging stations, to gas station and shopping center transformers for public place charging stations. The total daily profile projection of the total load, excluding the electric vehicle load for the peak day, in the plot region is given in Figure 6.



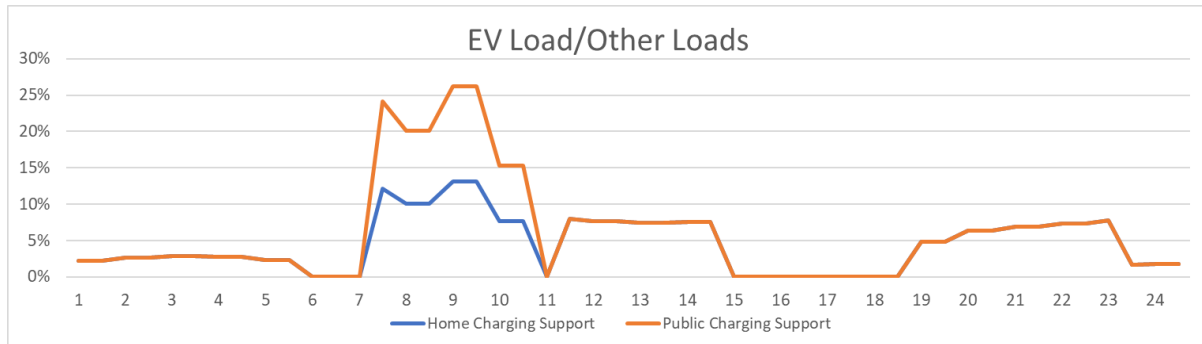
**Figure 6.** Pilot region total load profile projection excluding EV payload (2030) (MW)

The investigation of the effect of electric vehicle load on the distribution network was carried out in 2 different scenarios. In the scenario where home charging is supported, it is assumed that electric vehicles are mostly charged at homes. In the scenario where public charging is supported, it is assumed that electric vehicles are mostly charged in public places. It is assumed that when charging is supported in public areas, there will be more charging during the day, more fast charging points and regular charge load distribution at workplaces. In case home charging is supported, it is assumed that there will be more charging at night, more slow charging points and regular charge distribution at workplaces. Along with these assumptions, the representative daily charge profiles of electric vehicles belonging to the scenarios obtained from Monte Carlo simulations using the probability functions in Figure 5 are given in Figure 7. In the simulations, it is assumed that all the electric vehicles given in Table 2 for the pilot area use charging stations during the day.



**Figure 7.** Electric vehicle daily charging profiles for scenarios

Figure 8 shows the ratio of electric vehicle load to other loads in the network. The electric vehicle load rate during the day is 13% in the home charge support scenario and 26% in the public place charge support scenario.

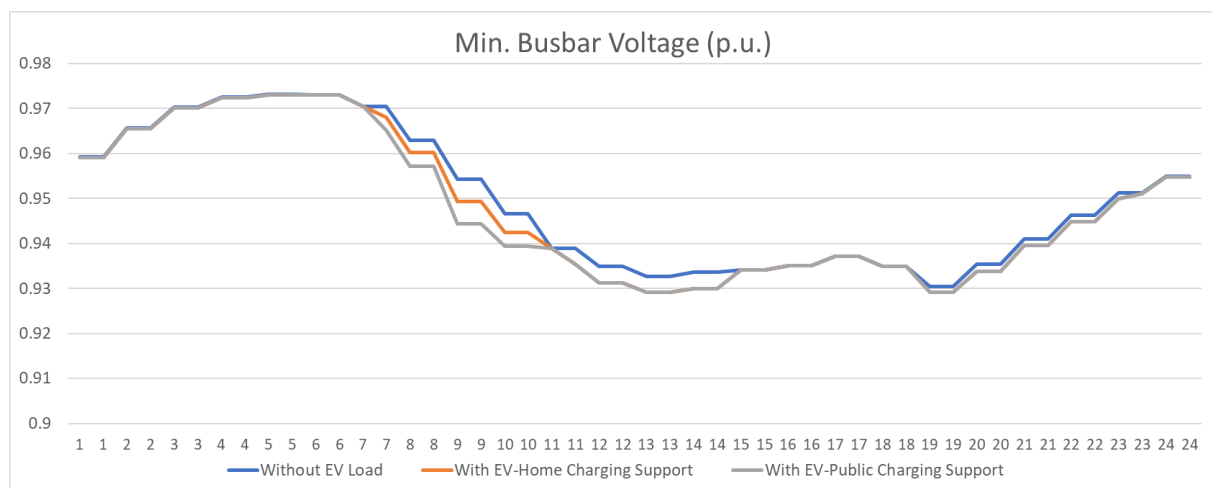


**Figure 8.** Ratio of EV load to other loads on the network

Load flow analyzes were carried out separately with and without the electric vehicle load on the network. As a result of the load flow analysis, the loading data of the line and transformer equipment and the voltage levels in the substations were examined.

The minimum voltage data of the busbar equipment obtained as a result of the analysis is given in Figure 9, the maximum loading data of the line equipment is given in Figure 10, and the maximum loading data of the transformer equipment is given in Figure 11.

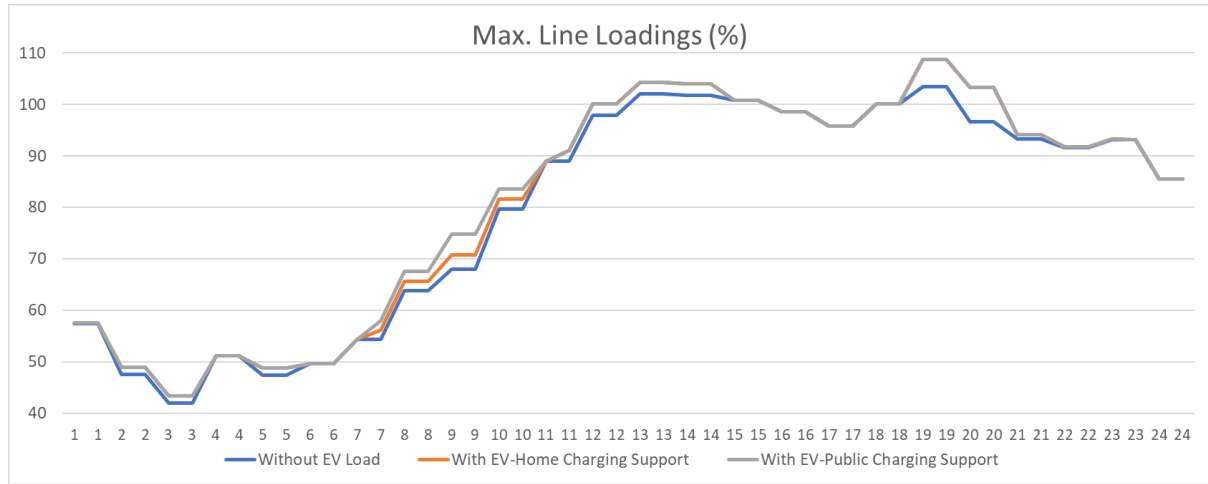
The inclusion of the electric vehicle load in the network from more than one point causes the effect of the load increase to spread to much more equipment in the network. In this case, rather than a high effect at a single point, a low effect occurs at many points. As seen in Figure 9, the minimum busbar voltage in the network decreases at most 1% when electric vehicles are included, and this corresponds to the times when the electric vehicle load ratio is the highest.



**Figure 9.** Minimum voltage for busbar equipment

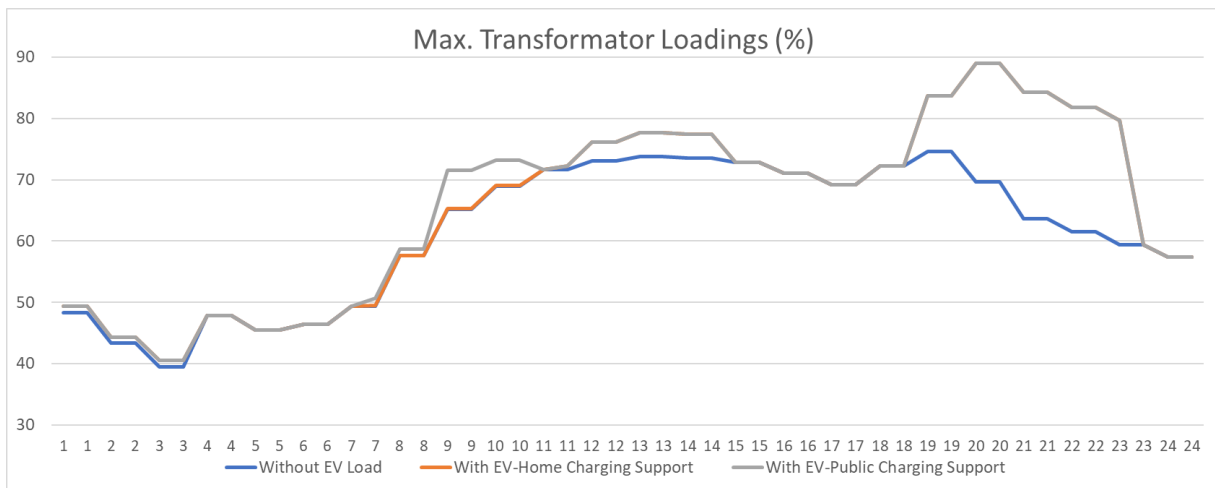
If a load is connected to any point in the network, an increase occurs in the loading of all lines between the load and the source. With the connection of electric vehicle loads at more than one point, an increase occurs in the loading of many lines in the network. As can be seen in Figure 10, with the inclusion of the electric vehicle load into the network, the maximum change in line loads was 7%. Since the line cross section increases as the load point approaches the source, there has not been a high increase in the loading of the primary and secondary lines in the network. It is seen that electric vehicle charging stations are built close to the source of the distribution network to be an advantage for line loading and voltage drop.

However, since the locations of home type charging stations are formed according to customer demands, it is not expected that every charging station will be close to the source.



**Figure 10.** Maximum loading of line equipment

Home charging stations are modeled on the LV grid of distribution transformers. Because of this situation, the effect of electrical vehicle loads on distribution transformers has been more than effects on other equipment. As seen in Figure 11, the maximum change in transformer loads has been observed as 20%. This situation is 20% of the transformer capacity of the electric vehicle load fed from low-capacity distribution transformers. The occupancy rate of distribution transformers is low in Turkey. The 20% load increase increased the transformer loading up to 90% in some hours, but there was no overload.



**Figure 11.** Maximum loading of transformer equipment

In previous similar studies, it was emphasized that electric vehicles will have negative effects on the distribution network because of their integration into the distribution network. It was emphasized that electric vehicles should also be taken into consideration in grid planning in the long term to solve these negative effects [14,28]. As another solution method, it has been suggested that electric vehicle charge-discharge methods should be properly structured and managed reasonably [29-30]. Compared with the similar results obtained in other studies, distribution transformers annual occupancy rate in Turkey (capacity factor) due to the fact that it is relatively low, Turkey was found to have a significant free capacity for EV charging load of the transformer in the mains. Therefore, it is not necessary to keep the power levels foreseen in the network capacity increase investments at very high values, and it is foreseen to increase the network capacity at lower powers.



## 5. CONCLUSION

In this study, in 2030, a significant number to reach the expected load charge in electric vehicles in Turkey, technical effects to a pilot metropolitan distribution network in Turkey was examined in two different scenarios (high charging at home, and high charge in the public place). The daily charging profiles of electric vehicles in both different scenarios were determined by probabilistic techniques. On the peak demand day, the effects of the electric vehicle charging load on the busbar voltages in the substations and loadings of line and transformer were observed with load flow analysis. As a result of the analysis, it was observed that the additional effect of the electric vehicle load on busbar voltages and line loads was at negligible levels. The most important reason for the electricity distribution network in Turkey, distribution transformers annual capacity factor (occupancy rate) is quite low (according to the difference between peak and minimum load of very high) and is to be filled with intelligent charging method of free capacity (at home charge is usually low load the amount of simultaneous demand is at a predictable level due to the fact that it occurs during night hours and the charging points are limited in the public place.). As a result, between 2018 and 2030, electricity demand increases by an average of 5% (excluding electric vehicles) annually, and if the grid investments required for this load increase are realized in accordance with the demand increase, as in previous years, a negligible level of technical problem is observed in the grid integration of electric vehicles. On the other hand, if the assumptions considered in this study are realized differently, different results may occur. Therefore, the most critical assumptions in this study are the annual demand increase, the network investments required for this demand increase, and the occupancy rates of transformers to be followed by the distribution companies.

## ACKNOWLEDGMENTS

This study was supported with the project number 9180003 under the program of "TÜBİTAK TEYDEB 1509 - International Industry R&D Projects".

## REFERENCES

- [1] Habib S., Kamran M., Rashid U., Impact analysis of vehicle-to-grid technology and charging strategies of electric vehicles on distribution networks - A review, *Journal of Powers*, 277 (2015) 205-214.
- [2] Liu C., Chau K.T., Wu D., Gao S., Opportunities and Challenges of Vehicle-to-Home, Vehicle-to-Vehicle, and Vehicle-to-Grid Technologies, *Proc. IEEE*, 101 No. 11 (2013) 2409–2427.
- [3] Salah F., Ilg J.P., Flath C.M., Basse H. Dinther C.v., Impact of electric vehicles on distribution substations: A Swiss case study, *Applied Energy*, 137 (2015) 88-96.
- [4] Fernandez L.P., Roman T.G.S., Cossent R., Domingo C.M., Frias P., Assessment of the Impact of Plug-in Electric Vehicles on Distribution Networks, *IEEE Transactions on Power Systems*, 26 No. 1 (2011) 206-213.
- [5] Wu Q., Nielsen A.H., Impact Study of Electric Vehicle (EV) Integration on Medium Voltage (MV) Grids, 2011 2nd IEEE PES International Conference and Exhibition on Innovative Smart Grid Technologies, (2011) 1-7.
- [6] Mauri G., Valsecchi A., Fast charging stations for electric vehicle: The impact on the MV distribution grids of the Milan metropolitan area, 2012 IEEE International Energy Conference and Exhibition (ENERGYCON),(2012) 1055-1059.
- [7] Neagoe-Ştefana A.G., Neagoe A.C., Mandiş A.C., Impact of charging electric vehicles in residential grid on the power losses and voltage plan, 2014 International Symposium on Fundamentals of Electrical Engineering (ISFEE), (2014) 1-4.
- [8] Al-Musawi L., Tran R., Dang M., Al-Mutawaly N., The impact of EV/PHEV chargers on residential loads-A case study, 2013 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC),(2013) 1-4.

- [9] Vaisambhayana S., Tripathi A., Study of electric vehicles penetration in Singapore and its potential impact on distribution grid, 2016 Asian Conference on Energy, Power and Transportation Electrification (ACEPT), (2016) 1-5.
- [10] Di Paolo M., Analysis of harmonic impact of electric vehicle charging on the electric power grid, based on smart grid regional demonstration project — Los angeles, 2017 IEEE Green Energy and Smart Systems Conference (IGESSC), (2017) 1-5.
- [11] Yiyun T., Can L., Lin C., Lin L., Impacts of electric vehicles on power grid, IET Conference Publications, (2012) 1-5.
- [12] Rizvi S.A.A., Xin A., Masood A., Iqbal S., Jan M.U., Rehman H., Electric Vehicles and Their Impacts on Integration into Power Grid: A Review, 2018 2nd IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), (2018) 1-6.
- [13] Bora Y. (2017). Elektrikli Araç Sistemlerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [14] Temiz A. (2015). Assessment of Impacts of Electric Vehicles on Low Voltage Distribution Networks in Turkey, Middle East Technical University Graduate School of Natural and Applied Sciences, Ankara.
- [15] Türkiye Ulaştırma Sektörünün Dönüşümü: Elektrikli Araçların Türkiye Dağıtım Şebekesine Etkileri, SHURA Enerji Dönüşüm Merkezi,(2019).
- [16] Elektrikli Araçlar, Dünya Enerji Konseyi Türkiye, Yeni Enerji Teknolojileri Çalışma Grubu,(2018).
- [17] Situ L., Electric Vehicle Development: The Past, Present & Future, 3rd International Conference on Power Electronics Systems and Applications,(2009) 1-3.
- [18] Polat Ö., Yumak K., Sezgin M.S., Yumurtacı G., Gül Ö., Elektrikli Araç ve Şarj İstasyonlarının Türkiye'deki Güncel Durumu, VI. Enerji Verimliliği, Kalitesi Sempozyumu ve Sergisi - EVK,(2015)
- [19] Poullikkas A., Sustainable Options for Electric Vehicle Technologies, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 41 (2015) 1277-1287.
- [20] Morrow K., Karner D., Francfort J., Plug-in Hybrid Electric Vehicle Charging Infrastructure Review, Final Report Battelle Energy Alliance,(2008).
- [21] Bayındır R., Yeşilbudak M., Çetinkaya Ü., Güç Sistemlerinde Gerilim Kararlılığını Etkileyen Faktörler, Gazi University Journal of Science, 3 (2015) 595-602.
- [22] Türkiye'nin Enerji Sisteminde Yenilenebilir Kaynakların Artan Payı: İletimde Genişleme ve Esneklik Seçenekleri., SHURA Enerji Dönüşüm Merkezi,(2018).
- [23] TÜİK, Türkiye İstatistik Kurumu, (2019), İl bazında gayrisafi yurt içi hasıla, iktisadi faaliyet kollarına göre, cari fiyatlarla, NACE Rev.2, 2004-2017
- [24] Dinçer, B., Özaslan, M., 2004. İlçelerin Sosyo-Ekonomik Gelişmişlik Sıralaması Araştırması (2004). Devlet Planlama Teşkilatı, Ankara
- [25] TÜİK, Türkiye İstatistik Kurumu, Eğitim İstatistikleri, [http://tuik.gov.tr/PreTablo.do?alt\\_id=1018](http://tuik.gov.tr/PreTablo.do?alt_id=1018)
- [26] Fishman G. S., (1995). Monte Carlo: Concepts, Algorithms, and Applications. New York: Springer.
- [27] Dvorkin Y., Wang Y., Pandzic H., Kirschen D., Comparison of Scenario Reduction Techniques for the Stochastic Unit Commitment. IEEE PES General Meeting| Conference & Exposition, (2014) 1-5.

- [28] Tekdemir İ.G., Alboyacı B., Güneş D., Şengül M., A Probabilistic Approach for Evaluation of Electric Vehicles' Effects on Distribution Systems, 2017 4th International Conference on Electrical and Electronic Engineering (ICEEE), Ankara, (2017) 143-147
- [29] Wang H., Song Q., Zhang L., Wen F., Huang J., Load Characteristics of Electric Vehicles in Charging and Discharging States and Impacts on Distribution Systems, International Conference on Sustainable Power Generation and Supply (SUPERGEN 2012), Hangzhou (2012) 1-7.
- [30] Zhou X., Zou L., Ma Y., Gao Z., Research on Impacts of The Electric Vehicles Charging and Discharging on Power Grid, 2017 29th Chinese Control And Decision Conference (CCDC), Chongqing (2017) 1398-1402



## Selecting and Analyzing Appropriate Probability Distributions for Reliability of Electrical Transmission Lines

Yunus KARA<sup>1,\*</sup> , Mehmet Rahmi CANAL<sup>2</sup> , İbrahim SEFA<sup>3</sup> , Fatih Emre BORAN<sup>4</sup> 

<sup>1</sup> Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, 50300, NEVŞEHİR

<sup>2</sup> İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Biyomedikal Mühendisliği Bölümü, 44280, MALATYA

<sup>3</sup> Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 06560, ANKARA

<sup>4</sup> Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, 06560, ANKARA

### Abstract

Reliability is the ability of a system and/or system components to function within a specified time under specified conditions. One of the most important criteria of electricity transmission systems is to be able to keep the energy on the system continuously within the limits and to be interrupted for the least possible time. The reliability study offers important advantages such as determining the appropriate operating range of the system and making the necessary intervention. In this study, it is aimed to show that the transmission lines can be interrupted for the least amount of time within the specified limits when the maintenance and the operation activities of electricity transmission lines are carried out with Reliability Centered Maintenance (RCM) in the foreground. In this direction, reliability analysis was conducted using transmission line fault data. Also, the Anderson-Darling goodness of fit test was performed to determine from which statistical distribution the transmission line fault data came from. The reliability of the transmission line is evaluated with the Log-normal distribution, which is determined by the goodness of fit. As a result of the reliability assessment, the reliability of the transmission line was found to be low. The advantages that transmission lines can provide when maintenance and operating activities are conducted based on reliability are presented.

### Article Info

Research article  
 Received: 30/01/2021  
 Revision: 22/02/2021  
 Accepted: 22/02/2021

### Makale Bilgisi

Araştırma makalesi  
 Başvuru: 30/01/2021  
 Düzeltilme: 22/02/2021  
 Kabul: 22/02/2021

### Keywords

Goodness of fit  
 Anderson-Darling Test  
 Log-normal Distribution  
 Reliability Analysis  
 MTBF  
 RCM

### Anahtar Kelimeler

Uyum iyiliği  
 Anderson-Darling Test  
 Log-normal Dağılım  
 Güvenirlilik Analizi  
 MTBF  
 RCM

## Elektrik İletim Hatlarının Güvenirliği için Uygun Olasılık Dağılım Seçimi ve Analizi

### Öz

Güvenirlilik, bir sistemin veya sistem bileşenlerinin belirlenen süre içerisinde, belirtilen koşullarda işlevini yerine getirme yeteneğidir. Elektrik iletim sistemlerinin en önemli kriterlerinden birisi sistem üzerindeki enerjiyi limitler dâhilinde sürekli tutabilmek ve mümkün olan en az süre kesintiye gitmektir. Güvenirlilik çalışması, sistemin uygun çalışma aralığının tespit edilip gerekli müdahalenin yapılması gibi önemli avantajlar sunmaktadır. Bu çalışmada, elektrik iletim hatlarının bakım ve işletim faaliyetlerinin Güvenirlilik Merkezli Bakım (Reliability Centered Maintenance -RCM) ön planda tutularak yapıldığında, belirtilen sınırlar dahilinde iletim hatlarının en az sürede kesintiye uğrayabileceğinin gösterilmesi amaçlanmıştır. Bu doğrultuda, iletim hattı arıza verileri kullanılarak güvenirlilik analizi yapılmıştır. Ayrıca, iletim hattı arıza verilerinin hangi istatistiksel dağılımdan geldiğini belirlemek için Anderson-Darling uyum iyiliği testi yapılmıştır. Uyum iyiliği ile belirlenmiş olan Log-normal dağılım ile iletim hattının güvenirlilik değerlendirilmesi yapılmıştır. Güvenirlilik değerlendirilmesi sonucunda iletim hattının güvenirliliğinin düşük olduğu görülmüştür. İletim hatlarının bakım ve işletim faaliyetlerinin güvenirlilik merkezli yapıldığında sağlayabileceği faydalar sunulmuştur.

## 1. INTRODUCTION

Long-lasting operation of the system without failure provides a safer environment in terms of efficiency and cost, as well as the employee health and safety. Electricity transmission lines are asked to remain continuously energized. It is undesirable to cut off the energy on the line. It is essential to keep the lines energized and to complete the interruption as soon as possible. In order to meet these conditions, maintenance work is increased and provided in the current situation. But, increasing maintenance work will increase the cost and number of personnel. At the same time, it will prolong the staff's exposure to risk in the work area. In the literature, the process called RAMS (Reliability, Availability, Maintainability and Safety) has gained importance in order to minimize the afore-mentioned problems. RAMS, which is the basic principle of preventive maintenance, is effective in reducing the maintenance time, the number of failures and risk level, and extending the operating time of the system. Due to the preventive advantage of RAMS activities, the health and the safety of employees coincide with the proactive prevention approach. The most important step of RAMS studies is Reliability Centered Maintenance (RCM). RCM is a technique used to develop the cost-effective maintenance plans [1]. Reliability-centered maintenance provides the opportunity to determine the appropriate operating range of the system and to make the necessary intervention.

IEEE (The Institute of Electrical and Electronics Engineers) defines reliability as "the ability of a system or component to perform the specified functions for a certain period of time" [2]. Reliability is an interdisciplinary work subject used in almost all engineering fields that try to bring safety, time, cost and quality to the appropriate values as much as possible. Typical criteria for reliability are error rate/frequency, average downtime, and average time between failures. Mathematically, reliability can be expressed as the probability that the time to failure of the component or system is greater than or equal to a certain time ( $t$ ), denoted by  $R(t) = P(T \geq t)$ , where  $R(t)$  is reliability,  $P$  is probability,  $T$  is any time, and  $t$  is the determined time [3].

Reliability depends on the quality of the data used in the studies. System reliability models are applied to the probability theory with the aim of adapting error data to statistical distribution models and this process is created by data analysis. The purpose of data analysis is to obtain reliability and hazard functions, and two methods are used for this. The first one of these methods is the nonparametric method. In this context, a nonparametric method is a method that takes into account experience and observations based on the field experience rather than applying a mathematical method. On the other hand, the second one is parametric method. It is usually the preferred method and is characterized (simulated) by an appropriate distribution of the fault data [3]. There are many distributions used in parametric evaluation of the reliability. Among these distributions, the most common ones are normal, log-normal, Weibull, gamma, and exponential distributions [4, 5].

According to IEEE P1366 standard electrical distribution reliability indices, the mostly used indices are system average interruption frequency index (SAIFI) and system average interruption duration index (SAIDI) [6]. SAIFI is commonly used as a reliability indicator and is calculated using the error rate ( $\lambda$ ) criterion. Error rate (failure rate) criterion plays an important role in reliability and survival studies. With the failure rate model, a mathematical model of the distribution can be created for a specific life span [7]. Mean Time to Between Failure (MTBF) is the inverse of the error rate, and the MTBF criterion is one of the most widely used criteria in reliability calculations [8]. Reliability assessments aim to calculate the frequency and the expected duration of the interruption. Reliability calculation with the use of distribution functions can provide many advantages, such as job planning, scheduling, warehouse inventory, the cost estimation of the interruption frequency and the expected duration of the outage.

In order to determine the reliability and the lifespan of the systems, past error data of the systems are required. The reliability/security study depends on the quality of the data and is basically conducted with two approaches. The first method of these approaches, the empirical approach (non-parametric method), derives the reliability and hazard functions directly from fault data [3]. It is usually carried out with data from experienced people in the field. As an example, the reliability ratio of the  $N$  component system can be calculated by proportioning the number of non-deteriorating equipment to the total number of equipment at the end of the  $t$  period. The other method is the parametric approach. As the name suggests, the parametric approach is characterized by parameters, in which fault data are defined with a probability distribution and

distribution parameters are estimated [3]. Goodness of fit tests need to be applied to examine whether the data fit a particular distribution [9, 10]. Reliability analysis and life expectancy estimation were applied to different areas in the literature, using parametric probability distributions. Gorjian Jolfaei et al. evaluated the reliability of the power generation system in order to minimize the operating and maintenance costs in waste-water treatment plants with the two-parameter Weibull model [11]. Kumar and Krishnan estimated the reliability evaluation and the expected first failure time with two-parameter Weibull Distribution using the MTBF criteria of twenty-four diesel compressors of the same brand and model [12]. Li et al. determined the lower and upper limits of reliability of electrical elements with three-parameter generalized inverse Weibull [13]. Volkanovski et al. developed a reliability assessment aimed at identifying weak points of the system in order not to interrupt electrical power systems [14]. Using the real data of the last five years used in the reliability assessment of the electrical power system, Tur assessed the reliability with the indices specified in the IEEE P1366 standard, and determined the most suitable feeder by commissioning the switching points determined to make the power system more reliable with four different configurations [15]. Deng et al. made their reliability assessment with Weibull distribution in order to improve the safe working coefficient of mobile equipment, reduce maintenance costs, and extend equipment life [16]. Roshan et al. conducted a study to find the most suitable model among the four distributions used in reliability evaluations, which are log-normal, Weibull, gamma, and exponential distribution [17]. Gupta et al. used the log-normal distribution to evaluate the reliability of variables showing positively skewed [18]. Raqab et al. examined the distinctions of Weibull, log-normal, and log-logistic distributions used for the lifespan estimation of the positively skewed data [19]. Dey and Kundu analyzed the discrimination of the positively skewed data, which is important in reliability assessment [20].

In this study, unlike other studies, in order to evaluate the reliability of the system as a whole, reliability analysis of Konya4-named feeder located in Yeşilhisar Transformer Center at the Kayseri 11th Regional Directorate under General Directorate of Turkish Electricity Transmission Corporation (TETC) was performed. First of all, fault record data emerging between 2014-2019 were collected. The goodness of fit test was used to determine which parametric distribution was appropriate for the collected fault record data. Then, the reliability value of Konya4 feeder was calculated by using the probability distribution. According to the calculated reliability value, it is concluded that when the maintenance and the operation activities of the electricity transmission lines are based on the reliability-centered maintenance studies, intervention and operation continuity within the specified limits can be achieved. The parametric probability distributions used in reliability evaluation are explained in Section 2. The goodness of fit test and reliability analysis application example for determining the proper distributions used in the reliability analysis of Konya4 feeder are included in Section 3. Results and evaluations are given in Section 4.

## 2. DISTRIBUTIONS USED FOR RELIABILITY ASSESSMENT

Different probability distributions are used for reliability assessment. Distributions are divided into two as discrete probability and continuous probability according to whether the variable is discrete and continuous. Fiondella and Xing state that the mean time between errors is evaluated by continuous probability distributions [21]. There are many continuous distributions in the literature for reliability assessment. Verma et al. classify the distributions of statistics that are widely used in reliability according to their application areas. This classification is shown in Table 1 [3].

**Table 1** Statistical distributions used for reliability assessment [3]

<i>Distribution Type</i>	<i>Application areas in reliability assessments</i>
<i>Poisson Distribution</i>	<i>Determining error occurrence rates per hour or per element</i>
<i>Binomial Distribution</i>	<i>In the reliability assessment of KooN systems</i>
<i>Exponential Distribution</i>	<i>Determining the lifetime distribution of non-repairable complex systems and the lifetime of multi-equipment systems</i>

<i>Weibull Distribution</i>	<i>Predicting downtime of equipment that is often subject to wear and fatigue</i>
<i>Log-normal Distribution</i>	<i>Modeling the repair time and modeling the lifetimes of metals and transistors</i>
<i>Normal Distribution</i>	<i>Analysing lifetime distribution and load resistance of components under load.</i>
<i>Gama Distribution</i>	<i>Modeling system failure timing and modeling time between maintenance</i>

## 2.1. Exponential Distribution

The exponential distribution is the most widely used distribution in reliability and risk assessment. Exponential distribution is used to model the useful life of the system [3]. Pham defined the probability density function (PDF)  $f(t)$  as a mathematical function that defines the probability of each element of a discrete set or the result range or possible values of a continuous variable. The probability density function for the exponential distribution is defined in Equation 1 [8]:

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad 0 < t < \infty, \quad f(t) = 0 \quad t < 0 \quad 1$$

$\lambda$  is the hazard (failure) rate, MTBF =  $1/\lambda$ .

Pham defined the cumulative density function (CDF)  $F(t)$  as a function that gives the probability of a random  $T$  variable to take values less than or equal to some  $t$  values. The cumulative density function for the exponential distribution is defined in Equation 2 [8].

$$F(t) = \int_0^t f(t) dt = 1 - e^{-\lambda t} \quad 2$$

The reliability function  $R(t)$  is a time-varying function and it is complementary to the cumulative function. In cases where the failure time is modeled, the cumulative density function represents the failure probability and the reliability function survival probability. Pham defined the reliability function for the exponential distribution in Equation 3 [8].

$$R(t) = 1 - F(t) = e^{-\lambda t} \quad 3$$

The hazard function  $h(t)$  is the ratio of the probability density function to the reliability. Pham defined the hazard function for the exponential distribution in Equation 4 [8].

$$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\lambda e^{-\lambda t}}{e^{-\lambda t}} = \lambda \quad 4$$

The mean value  $E(t)$  is the mean value of a distribution. Verma et al. defined the mean value for the exponential distribution in Equation 5 [8].

$$E(t) = \int_0^{\infty} t f(t) dt = \frac{1}{\lambda} \quad 5$$

Var (t) Variance is a statistical expression that determines the average distance of a variable set from the mean value in that set. Verma et al. defined the variance for the exponential distribution in Equation 6 [3].

$$Var(t) = E(T^2) - (mean)^2 = \left( \int_0^{\infty} t^2 f(t) dt \right) - \left( \frac{1}{\lambda} \right)^2 = \frac{2}{\lambda^2} - \frac{1}{\lambda^2} = \frac{1}{\lambda^2} \quad 6$$

## 2.2. Normal Distribution

Normal distribution is the most important and widely used distribution in statistics and probability fields. It is known as the Gaussian distribution, and is used to represent attrition information by which fatigue and aging will be modeled [3].

Pham defined the probability density function (PDF)  $f(t)$  for the normal distribution in Equation 7 [8].

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2}, \quad -\infty \leq t \leq +\infty \tag{7}$$

In the equation,  $\mu$  is the population mean, and  $\sigma$  is the population standard deviation, which is the square root of the variance.

Pham defined the cumulative density function (CDF)  $F(t)$  for the normal distribution in Equation 8 [8].

$$F(t) = \int_{-\infty}^t \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2} dt \tag{8}$$

The reliability function  $R(t)$  for Pham normal distribution is defined in Equation 9 [8].

$$R(t) = \int_t^{\infty} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2} dt \tag{9}$$

Here, Z transform is done for integral analysis. The z transformation is defined in Equation 10.

$$z = \frac{t-\mu}{\sigma} \tag{10}$$

Re-expression of the cumulative density function by substituting the Z transform is defined in Equation 11.

$$\Phi(z) = \int_{-\infty}^z \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{z^2}{2}} dz \tag{11}$$

Pham defined the hazard function  $h(t)$  for the normal distribution in Equation 12 [8].

$$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{f(t)}{1-\Phi(z)} \tag{12}$$

### 2.3. Log-normal Distribution

Log-normal distribution is the normal distribution with the natural logarithm of the variable that takes a continuous positive value. Log-normal distribution is used to model failure cycles of metals, lifetimes and repair times of transistors, and bearings [3].

Pham defined the probability density function (PDF)  $f(t)$  for the log-normal distribution in Equation 13 [8].

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma t} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln t-\mu}{\sigma}\right)^2}, \quad 0 < t \tag{13}$$

Pham defined the cumulative density function (CDF)  $F(t)$  for the log-normal distribution in Equation 14 [8].

$$F(t) = \Phi \left[ \frac{\ln t-\mu}{\sigma} \right] \tag{14}$$

In this equation  $\Phi$  is the standard normal distribution cumulative density function.

The reliability function  $R(t)$  for Pham log-normal distribution is defined in Equation 15 [8].

$$R(t) = 1 - \Phi \left[ \frac{\ln t-\mu}{\sigma} \right] \tag{15}$$

Pham defined the hazard function  $h(t)$  for the normal distribution in Equation 16 [8].

$$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma t} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln t-\mu}{\sigma}\right)^2}}{1-\Phi \left[ \frac{\ln t-\mu}{\sigma} \right]} \tag{16}$$

Verma et al. defined the mean value for the log-normal distribution in Equation 17 [3].

$$E(t) = e^{\mu+\frac{\sigma^2}{2}} \tag{17}$$

Verma et al. defined the variance for the log-normal distribution in Equation 18 [3].

$$Var(t) = e^{(2\mu+\sigma^2)}(e^{\sigma^2} - 1) \tag{18}$$



## 2.4. Weibull Distribution

The Weibull distribution has a wide application in reliability calculation due to its flexibility in modeling different distribution types. This distribution method can be used to model time for failure of lamps, relays, capacitors, germanium transistors, ball bearings, automobile tires, and some motors. In addition to being the most useful distribution function in reliability analysis, it is used in the classification of fault types, troubleshooting, preventive maintenance, and inspection activity programming [3].

Pham defined the probability density function (PDF)  $f(t)$  for the Weibull distribution in Equation 19 [8] as

$$f(t) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta}}, \quad 0 < t \quad 19$$

where  $\beta$  is the shape parameter, and  $\eta$  is the scale parameter.

Pham defined the cumulative density function (CDF)  $F(t)$  for the Weibull distribution in Equation 20 [8].

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta}} \quad 20$$

Pham defined the reliability function  $R(t)$  for the Weibull distribution in Equation 21 [8].

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta}} \quad 21$$

Pham defined the hazard function  $h(t)$  for the Weibull distribution in Equation 22 [8].

$$h(t) = \frac{\beta t^{\beta-1}}{\alpha^{\beta}} \quad 22$$

Verma et al. defined the mean value for the Weibull distribution in  $E(t)$  Equation 23 [3].

$$E(t) = \alpha \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \quad 23$$

In this equation,  $\Gamma(x)$  is the gamma function and it is defined in Equation 24.

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} y^{x-1} e^{-y} dy \quad 24$$

Verma et al. defined the variance  $\text{Var}(t)$  for the Weibull distribution in Equation 25 [3].

$$\text{Var}(t) = \sigma^2 = \alpha^2 \left[ \Gamma\left(1 + \frac{2}{\beta}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \right] \quad 25$$

## 3. RELIABILITY ANALYSIS EXAMPLE OF KONYA 4 FEEDER

The reliability analysis of the 380kV high voltage line, the total line length of 223km and the bidirectional current carrying capacity of the feeder, named Konya4 at the Kayseri 11th Regional Directorate Yeşilhisar Transformer Center under General Directorate of Turkish Electricity Transmission Corporation, was made. Restrictions such as land structure and general weather conditions that may cause failure in Konya4 feeder were ignored. Thus, the steps given below were followed for the reliability analysis.

### Step 1. Obtaining fault record data

The mean times between failures (MTBF) data were extracted from the last six years of fault records of the Konya4 feeder, and reliability assessment was aimed to be made with these data. The data do not have a specific frequency. In addition, the data are considered as data for malfunctions that cause the system to stop and that require manual or automatic intervention. It is aimed to evaluate the reliability of Konya4 feeder by choosing the most suitable one among the most used exponential, normal, log-normal and Weibull distributions in the literature. Thus, the data of the last six years of Konya4 feeder are given in Figure 1 below.

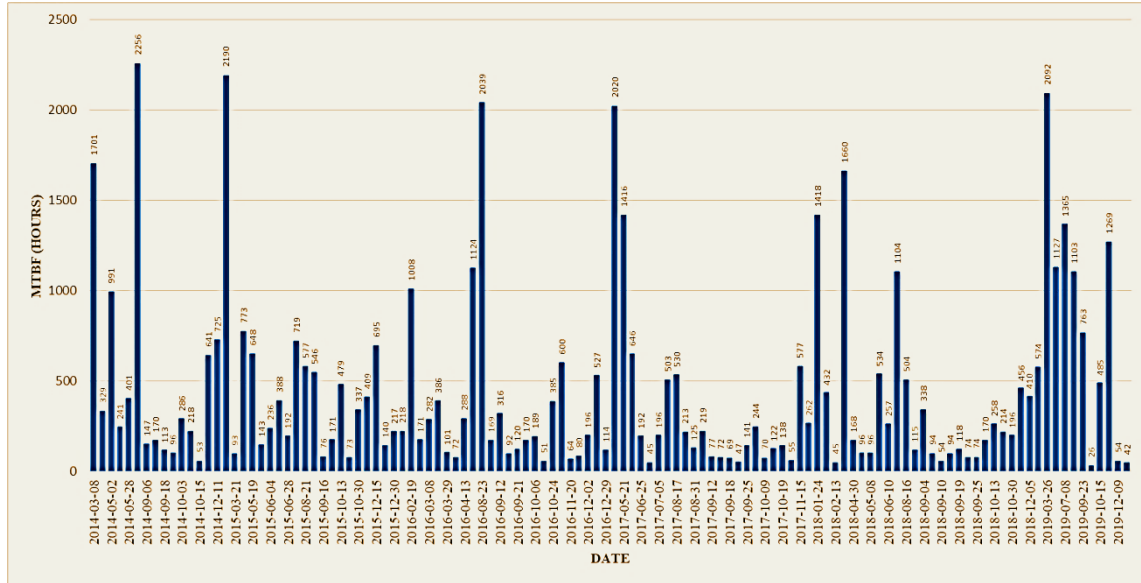


Figure 1. Fault MTBF times of Konya4 Feeder between 2014-2019 (hours)

**Step 2. Determining the probability distribution with the Goodness of Fit Test**

Goodness of fit test is a statistical test for choosing the appropriate distribution in the parametric approach. It is used to determine whether the data are suitable for a certain probability distribution. In other words, it tests whether the data comes from a specific or partially specified probability distribution [22]. The null hypothesis (H0) and the alternative hypothesis (H1) are defined to determine if random data fit a distribution.

H0: The data does not differ from the probability distribution; it is the specified distribution.

H1: There is a difference between the probability distribution of the data; it is not the distribution specified [3].

The classical approach to obtaining the null hypothesis fit test that a data has a certain probability distribution is to divide the possible values of random variables into a limited number of regions. The number of sample values entering each region is then determined and compared with the theoretical expected numbers under the specified probability distribution, and the null hypothesis is rejected when they are significantly different [22]. When performing the statistical evaluation of the data in good fit, the difference between the data and the distribution model is evaluated and this difference is desired to be small. If it is less than the value indicated at the end of the evaluation, H0 is accepted, or H1 is accepted [3, 23].

Goodness of fit can be expressed as the first step in data evaluation. There are different goodness of fit tests in the literature. Kolmogorov-Smirnov, Anderson-Darling, Cramer-von Missses, Pearson Chi-square, Shapiro-Wilk, Shapiro-Francia, Weisberg-Bingham, D'Agustino, Fillibun and Jarque-Bera can be given as examples of the most used of these tests [24]. The data used in the study are about the time between failures of the transmission line. In the goodness of fit studies, these durations are considered as hours, sorted according to chronological order and the Anderson-Darling test, which is the goodness of fit test, is classified according to periods during the application phase.

**Step 2.1. Anderson-Darling Goodness of Fit Test**

As a goodness of fit test, the Anderson Darling test calculates the Anderson-Darling statistics between the cumulative distribution function (CDF) and the empirical probability density function (EDF). For example, the Anderson Darling test is used to determine whether it belongs to a particular distribution [25]. Anderson-Darling goodness of fit test is widely used and has good strength properties [26]. Anderson-Darling goodness of fit test has the advantage of a more sensitive test by making use of other distributions (Normal, Lognormal, Exponential, Weibull, Logistic, etc.) in calculating the p value. Although calculating the p

value for each given statistical distribution is a disadvantage, software such as Minitab is turned it into an advantage.

Let the data  $x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_n$  be as follows in ascending order (Anderson-Darling equation for n data is shown in Equation 26 and Equation 27):

$$A_n^2 = n \int_{-\infty}^{+\infty} [F_n(x) - F(x)]^2 / [F(x)\{1 - F(x)\}] dF(x) \quad 26$$

Here,  $F_n(x)$  and  $F(x; 0)$  are EDF and CDF, respectively.

$$A_n^2 = -n - (1/n) \sum_{i=1}^n (2i - 1) \ln(u_i) + \ln(1 - u_{n-i+1}) \quad 27$$

Here,  $u_i = F(x_i); i = 1, 2, \dots, n$

The calculated test statistic is then compared with a critical value according to the importance of the values. Generally, if the test statistic is less than the critical value, the null hypothesis (H0) is accepted. If not, the alternative hypothesis (H1) is accepted. Critical value depends on test severity and sample size [3, 25, 27].

The p probability value is used to interpret the goodness of fit test results. As a result of the goodness of fit test of the data set, the p value is compared with the degree of significance ( $\alpha$ ) to determine whether the data differ from the statistical distributions. The significance level ( $\alpha$ ) is a value selected in the goodness of fit test evaluation process and is compared with the p value at the end of the test. In the Anderson-Darling test, the significance level,  $\alpha = 0.05$ , is generally used. In addition, the degree of importance ( $\alpha$ ) can be equal to values of 0.2, 0.1, 0.05, 0.02 and 0.01 [3, 25, 28]. These values are the percentage of the error made in rejecting the null hypothesis. For example, when the alpha value is selected as 0.1, it means rejecting the null hypothesis with a tolerance of 10% of the evaluation. The degree of importance ( $\alpha$ ) value is chosen and the p value is a value that can be calculated. The p value can be calculated statistically by different methods, but the comments are the same. If the p value is less than alpha, the null hypothesis is rejected; if the p value is greater than or equal to alpha, the null hypothesis is accepted [29]. In this study, the importance level was determined as  $\alpha = 0.05$ .

Minitab 19 statistics program was used to determine which distribution best fits the MTBF data of Konya4 feeder between 2014-2019, which is given in Figure 1. Normal, exponential, log-normal and Weibull distributions were tested according to Anderson-Darling goodness of fit. Thus, the test results obtained are shown in Table 2.

**Table 2.** Anderson-Darling compatibility results of distributions of Konya4 Feeder

<i>Distribution</i>	<i>AD</i>	<i>p</i>
<i>Normal</i>	<i>10.744</i>	<i>&lt;0.005</i>
<i>Exponential</i>	<i>2.253</i>	<i>0.005</i>
<i>Weibull</i>	<i>2.006</i>	<i>&lt;0.01</i>
<i>Log-normal</i>	<i>0.629</i>	<i>0.099</i>

\* In the Anderson-Darling test,  $\alpha$  was chosen as 0.05.

As can be seen in Table 2, the p value is less than 0.005 in the normal distribution, it is equal to 0.005 in the exponential distribution, it is less than 0.01 in the Weibull distribution, and it is equal to 0.099 in the log-normal distribution. According to these results, since  $p$  is  $0.099 > \alpha = 0.05$ , the null hypothesis (H0: Konya4 feeder data come from the Log-normal probability distribution family) is accepted, and the H1 hypothesis is rejected. (H1: There is a difference between the data of Konya4 feeder with normal, exponential, and Weibull probability distributions). Thus, the compatibility test curves made with Anderson-Darling are shown in Figure 2.

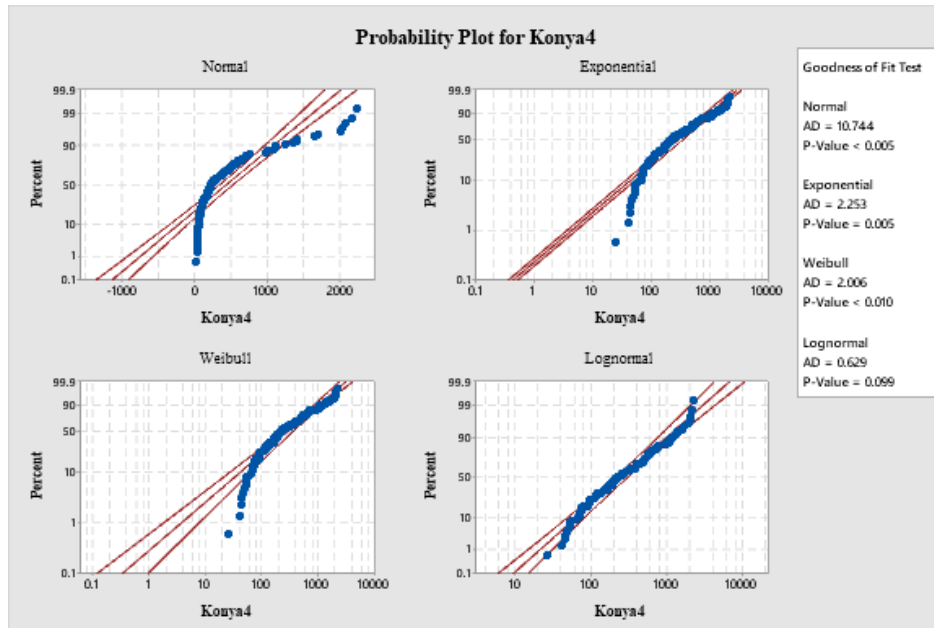


Figure 2. Anderson-Darling compatibility curves of Konya4 Feeder distributions

Figure 2 shows that, according to Anderson-Darling compatibility curves, the most harmonious distribution among the values remaining in the 95% confidence interval (CI) is the log-normal distribution.

Normality test and the normality test of Konya4 feeder data were performed in order to reveal whether the data conformed to the normal distribution. Skewness and kurtosis values in the normality test should be in the range of  $\pm 1$  according to Hair et al. According to Tabachnic and Fidel, the skewness and kurtosis values in the normality test results should be in the range of  $\pm 1.5$  [30, 31]. When the normality test is applied, according to Anderson-Darling, to the MTBF data of Konya4 feeder, it is seen that the skewness is 1.98, that the kurtosis is 3.53, and that the curve is positively skewed according to Figure 3.

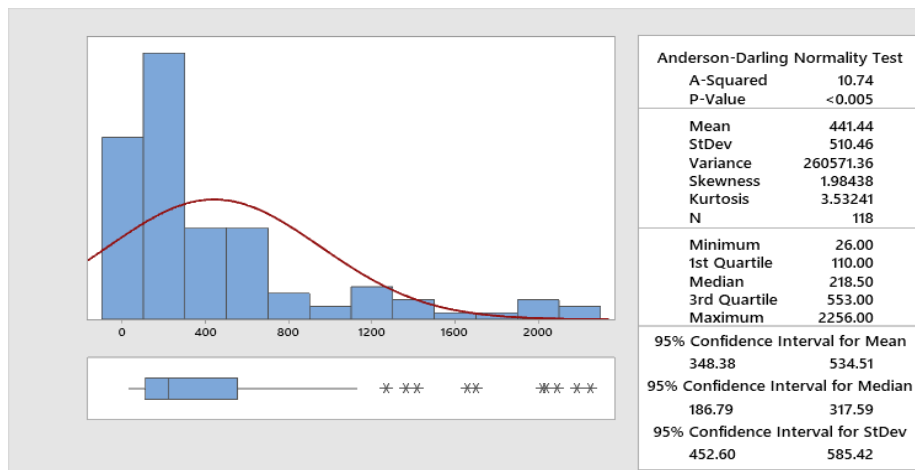


Figure 3. Normality curve of Konya4 feeder

Generally, the data that do not show normality can be normalized by transforming. According to Tabachnic and Fidel, data showing positive skewness is normalized by taking its natural logarithm (ln) [31]. When the natural logarithm of the Konya4 feeder is taken and subjected to the normality test again, it is seen that the skewness: 0.2 and the kurtosis: -0.76 values and the distribution become close to normal as can be seen in Figure 4. Thus, it is verified to perform reliability assessment with log-normal distribution showing the best performance in goodness of fit. It coincides with the studies in the literature that use log-normal distribution in reliability evaluation for the data showing positively skewed.

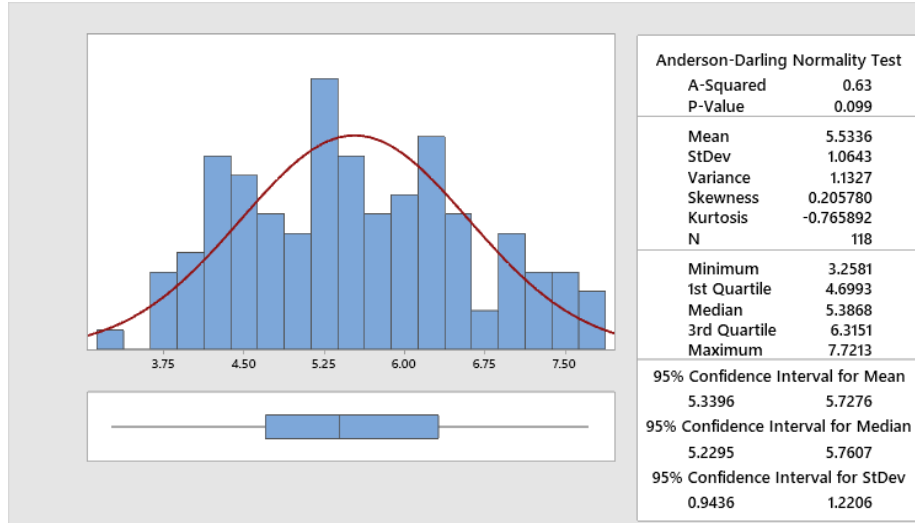


Figure 4. Normality test curve with natural logarithm of Konya4

**Step 3. Calculation of the reliability value of Konya4 feeder**

In the previous section, it was determined that the most appropriate distribution to be used for the reliability studies of the MTBF data of Konya4 feeder is the log-normal distribution. These equations used in the reliability assessment of the log-normal distribution in Section 2.3 are defined in 14, 15, 16, 17, and 18. Log-normal distribution is a parametric distribution, and firstly, location parameter ( $\mu$ ) and scale parameter ( $\sigma$ ) are calculated, which are the parameters of the log-normal distribution. Microsoft Excel program is used in calculations.

The location parameter,  $\mu$ , is defined in Equation 28.

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^n \ln t_i}{n} \tag{28}$$

Scale parameter  $\sigma$  is defined in Equation 29.

$$\sigma = \sqrt{\frac{n \sum_{i=1}^n (\ln t_i)^2 - (\sum_{i=1}^n \ln t_i)^2}{n(n-1)}} \tag{29}$$

In the calculations made using Equation 28 and Equation 29, location parameter and scale parameter were found as follows, respectively:

$$\mu = 5.533591979 \text{ and } \sigma = 1.064268901$$

The probability density function according to the log-normal distribution (PDF) is found as follows when evaluated according to Equation 30:

$$f(t) = \frac{1}{\sigma t \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln t - \mu}{\sigma}\right)^2} = 0.002456939 \tag{30}$$

When the cumulative density function (CDF) according to log-normal distribution is evaluated according to Equation 31, it was found as follows:

$$F(t) = \Phi \left[ \frac{\ln t - \mu}{\sigma} \right] = 0.236737331 \tag{31}$$

The reliability function  $R(t)$  according to the log-normal distribution was found as follows when evaluated according to Equation 32:

$$R(t) = 1 - \Phi \left[ \frac{\ln t - \mu}{\sigma} \right] = 1 - 0.236737331 = 0.763262669 \tag{32}$$

When the hazard function  $h(t)$  according to the log-normal distribution is evaluated according to Equation 33, it is found as follows:

$$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{0.002456939}{0.763262669} = 0.00322 \tag{33}$$

The average value  $E(t)$  according to the log-normal distribution was found as follows when evaluated according to Equation 34:

$$E(t) = e^{\mu + \frac{\sigma^2}{2}} = e^{6.094} = 443.191 \text{ hours} \tag{34}$$

When the reliability evaluation was made using the Minitab 19 program, the curves in Figure 5 were obtained.

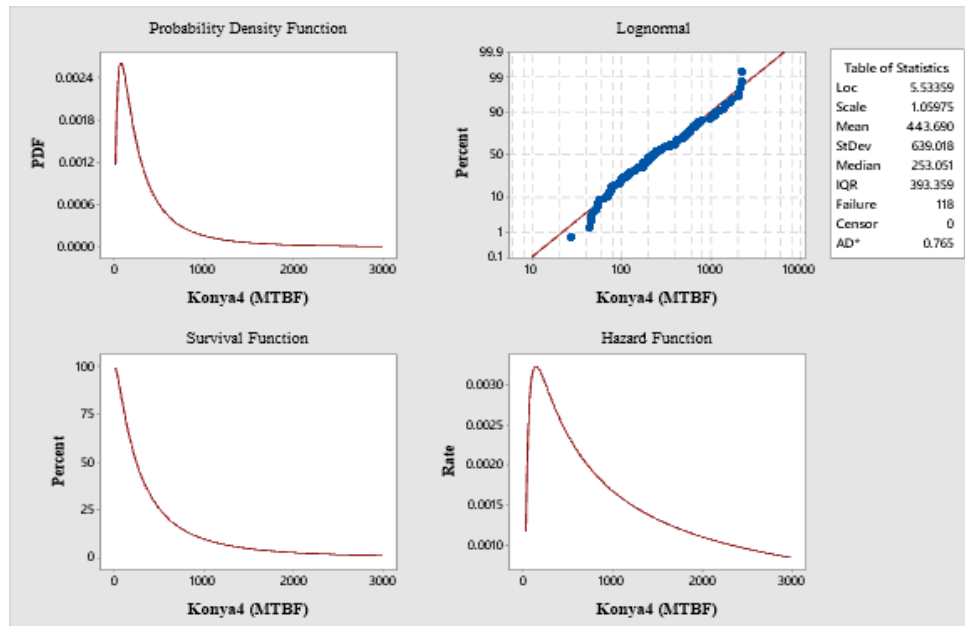


Figure 5. Konya4 feeder reliability evaluation curves

As the curves in Figure 5 demonstrate, the location parameter, scale parameter, and average values are equal when the values in the statistical table, which is the program output, and the values caused by the rounding in the calculations are ignored. While the probability density function curve and the hazard function curve should ideally be in the form of a bell curve, it was found as a positively skewed curve in the study. Most of the fault times on a positively skewed curve are less than the average value. The results of the reliability assessment of the Konya4 feeder are low. Low reliability may cause the transmission line to be interrupted at unexpected times. With the RCM, the reliability value can be raised and the intervention time to the system can be adjusted. If the maintenance work of the Konya4 feeder system had been based on reliability, it could have been interpreted that many failures would occur before the planned intervention and the success of the reliability centered maintenance work would be low when planned intervention to the system at an average value was required.

#### 4. CONCLUSION AND EVALUATION

In this study, the reliability model has been created with the MTBF values obtained by extracting the fault values of the 380 kV electricity transmission line feeder named Konya4 at the Kayseri 11th Regional Directorate Yeşilhisar Transformer Center under General Directorate of Turkish Electricity Transmission Corporation. While creating the reliability model, evaluation is made with parametric methods. The goodness of fit test, which is the most appropriate distribution of probability, is performed using the MINITAB 19 statistical program. According to the result of the goodness of fit test, the log-normal distribution is determined as the most appropriate distribution. Reliability is evaluated using log-normal

distribution. As a result of the evaluation, the reliability is found as  $R(t) = 0.763$  and the mean value  $E(t) = 443.191$  hours. The following assessments have been proposed based on these results:

1) The closer the reliability value is to 1, the longer the system may be able to operate safely. Reliability value of Konya4 feeder is far from 1. The most important reason for the low reliability value is that the maintenance and operation activities used are not reliability-centered. When maintenance and operation activities are based on reliability, activity planning can be created more easily. In reliability-centered maintenance activities, system intervention is carried out on average time. When the fault data set is analyzed, it is seen that the majority of the time between failures is smaller than the average value and the number and duration of intervention to the system are high. Since intervention to the system may be planned in reliability-centered maintenance activities, preventive maintenance work can be used more effectively, thus saving on costs, personnel, time, and materials to be kept in the warehouse inventory. In addition, many risks in terms of the safety of employees can be eliminated as the working time under risk can be shortened.

2) When the maintenance and operation activities are based on reliability, the interruption time of the transmission lines can be kept as low as possible. Turkish Electricity Transmission Corporation keeps a regular and careful plan of failure records that occur in the system. General maintenance plans are scheduled by taking into account the workload. There are other factors such as errors caused by meteorological conditions and errors caused by renewed equipment in reliability-centered maintenance activities. Turkish Electricity Transmission Corporation records these entries for different purposes. These recorded data can be easily evaluated within reliability-centered maintenance studies. If the information in the current method can be collected under the reliability-centered maintenance studies without requiring major changes for reliability-centered maintenance studies, the awareness of the advantages of reliability-centered maintenance can be achieved and used correctly.

## REFERENCES

- [1] Yssaad, B., M. Khiat, and A. Chaker, Reliability centered maintenance optimization for power distribution systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2014. 55: p. 108-115.
- [2] Geraci, A., *IEEE standard computer dictionary: Compilation of IEEE standard computer glossaries*. 1991: IEEE Press.
- [3] Verma, A.K., S. Ajit, and D.R. Karanki, Reliability of Complex Systems, in *Reliability and Safety Engineering*. 2016, Springer. p. 123-159.
- [4] Nayak, P., A.N. Padmasali, and S.G. Kini. Life estimation of high power LED using distribution based reliability analysis. in *2017 2nd IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics, Information & Communication Technology (RTEICT)*. 2017. IEEE.
- [5] Modarres, M., M.P. Kaminskiy, and V. Krivtsov, *Reliability engineering and risk analysis: a practical guide*. 2016: CRC press.
- [6] Transmission and D. Committee, *IEEE Guide for Electric Power Distribution Reliability Indices*. IEEE Std, 2003. 1366: p. 2003.
- [7] Shakhathreh, M.K., A.J. Lemonte, and G.M. Arenas, The log-normal modified Weibull distribution and its reliability implications. *Reliability Engineering & System Safety*, 2019. 188: p. 6-22.
- [8] Pham, H., *Springer handbook of engineering statistics*. 2006: Springer Science & Business Media.
- [9] Krit, M., *Goodness-of-fit tests in reliability: Weibull distribution and imperfect maintenance models*. 2014, Université de Grenoble.
- [10] Alptekin, D., *New goodness-of-fit tests based on empirical distribution function*, Doctoral dissertation, Hacettepe University Graduate School of Science and Engineering, Ankara, 2018.

- [11] Gorjian Jolfaei, N., et al., Reliability modelling with redundancy—A case study of power generation engines in a wastewater treatment plant. *Quality and Reliability Engineering International*, 2020. 36(2): p. 784-796.
- [12] Kumar, A.R. and V. Krishnan, A Study on System Reliability in Weibull Distribution. *Methods*, 2017. 5(3).
- [13] Li, C., Teng, Y., An, L., & Dan, Q., Imprecise reliability of lifetime data based on three-parameter generalized inverse Weibull distribution. in *2019 IEEE Innovative Smart Grid Technologies-Asia (ISGT Asia)*. 2019. IEEE.
- [14] Volkanovski, A., M. Čepin, and B. Mavko, Application of the fault tree analysis for assessment of power system reliability. *Reliability Engineering & System Safety*, 2009. 94(6): p. 1116-1127.
- [15] Tur, M.R., Reliability Assessment of Distribution Power System When Considering Energy Storage Configuration Technique. *IEEE Access*, 2020. 8: p. 77962-77971.
- [16] Deng, J., Y. Liu, and H. Li. Reliability Analysis of Rotating Equipment Based on Weibull Distribution. in *2019 Chinese Control And Decision Conference (CCDC)*. 2019. IEEE.
- [17] Roshan, S., Mohan, B. R., Kumar, M., & Vandanapu, N. Model selection among log-normal, Weibull, Gamma and generalized exponential distributions. in *2017 6th International Conference on Reliability, Infocom Technologies and Optimization (Trends and Future Directions)(ICRITO)*. 2017. IEEE.
- [18] Gupta, R.C., M. Ghitany, and D. Al-Mutairi, Estimation of reliability from a bivariate log-normal data. *Journal of Statistical Computation and Simulation*, 2013. 83(6): p. 1068-1081.
- [19] Raqab, M.Z., S.A. Al-Awadhi, and D. Kundu, Discriminating among Weibull, log-normal, and log-logistic distributions. *Communications in Statistics-Simulation and Computation*, 2018. 47(5): p. 1397-1419.
- [20] Dey, A.K. and D. Kundu, Discriminating among the log-normal, Weibull, and generalized exponential distributions. *IEEE Transactions on reliability*, 2009. 58(3): p. 416-424.
- [21] Fiondella, L. and L. Xing, Discrete and continuous reliability models for systems with identically distributed correlated components. *Reliability Engineering & System Safety*, 2015. 133: p. 1-10.
- [22] Ross, S.M., *Introduction to probability and statistics for engineers and scientists* (Associated Press). 2009.
- [23] Montgomery, D.C., G.C. Runger, and N.F. Hubele, *Engineering statistics*. 2009. Hoboken, NJ: Wiley. 4.
- [24] Dufour, J.M., et al., Simulation-based finite sample normality tests in linear regressions. *The Econometrics Journal*, 1998. 1(1): p. 154-173.
- [25] Han, D., X. Tan, and P. Shi. Clutter distribution identification based on anderson-darling test. in *2017 3rd IEEE International Conference on Computer and Communications (ICCC)*. 2017. IEEE.
- [26] Giles, D.E., A saddlepoint approximation to the distribution function of the Anderson-Darling test statistic. *Communications in Statistics-Simulation and Computation*, 2001. 30(4): p. 899-905.
- [27] Tolikas, K. and S. Heravi, The Anderson–Darling goodness-of-fit test statistic for the three-parameter lognormal distribution. *Communications in Statistics—Theory and Methods*, 2008. 37(19): p. 3135-3143.
- [28] Jäntschi, L. and S.D. Bolboacă, Computation of probability associated with Anderson–Darling statistic. *Mathematics*, 2018. 6(6): p. 88.



- [29] Parchami, A., S.M. Taheri, and M. Mashinchi, Testing fuzzy hypotheses based on vague observations: a p-value approach. *Statistical Papers*, 2012. 53(2): p. 469-484.
- [30] Hair, J. F., Black, W., Babin, B., & Anderson, R., *Multivariate Data Analysis*. Always learning. 2013, Pearson Education Limited.
- [31] Tabachnick, B.G. and L.S. Fidell, *Using Multivariate Statistics*, Always Learning. 2013, Boston, MA: Pearson.

## Re-design of The Ayran Package For Children

 Zeynep ESMER<sup>1\*</sup> , Hüdayim BAŞAK<sup>1</sup> 
<sup>1</sup>Gazi University Faculty of Technology, Department of Industrial Design Engineering, 06500, Yenimahalle, ANKARA

### Graphical/Tabular Abstract

#### Article Info:

Research article  
 Received:18/10/2020  
 Revision:01/03/2021  
 Accepted:08/03/2021

#### Highlights

- TRIZ in product design
- Contradictions matrix
- Function analysis

#### Keywords

TRIZ  
 Packaging Design  
 Creative Thinking  
 Techniques  
 Product Design

The form that is reached at the end of the research and design process is shaky and remarkable. It has curves suitable for children's ergonomics. It also has an easy-to-open and closable cover. It has a flat surface for both swinging and shelving. This different form is mobile and striking, unlike the current product.



Figure A. Design proposal

**Purpose:** In this study, it is aimed to make improvements on packaging design, which has an important place in today's consumption age. For this reason, buttermilk packaging has been redesigned to encourage healthy drinks for children. Due to the lack of studies in this field in the market, it is aimed to contribute.

**Theory and Methods:** Package design and definition of buttermilk were made. Function analysis of the product was extracted and contradictions were identified. These contradictions were resolved with the help of creative principles. With this process, TRIZ has been completed. The proposed design was 3D modeled, and also illustrated explanations about the user.

**Results:** As a result of the detection of the contradictions, the product design was realized in dimensions suitable for the hand ergonomics of the children. In addition, a graphic that will appeal to children is designed to attract attention. At the end of this process, a product that occupies less space on the shelf, has a different form, has been innovated in the rinsing function and a remarkable product is obtained.

**Conclusion:** In this study, the history of packaging design is explained and the place of packaging in the sector is defined. TRIZ has been defined and used in packaging design. They are sequentially identified by the available packaging sizes and the problems children experience during use are listed. Next, two contradictions were found by function analysis, and a total of 4 creative principles were used. With these creative principles, the rocking motion is achieved that adds innovation to the package. Graphic design was done after all the steps. As a result of the stages, the product has been designed as a fun-looking toy package that children can use.



## Re-design of The Ayran Package For Children

Zeynep ESMER<sup>1\*</sup> , Hüdayim BAŞAK<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Bölümü, 06500, Yenimahalle, ANKARA

### Abstract

Packaging design has a very important position for companies in today's consumption age. Packages exhibited together on the shelves in a determined order are representatives of companies that compete with each other. These products cannot fulfill their duty unless they reach the right target audience. For this reason, determining the target audience and presenting designs for it is very important for the product to be successful. In this study, buttermilk packages were examined. It is seen that the product, whose target audience is kept on a very wide scale, is not sufficient for the perception management for the use of children. For this, commonly used packaging forms were analyzed and the problems experienced by children while using it were listed. TRIZ (Theory of Inventive Problem Solving) was used for problem detection. Solutions to the problems that arise as a result of the function analysis and need to be solved are presented with the contradiction matrix. In these roads, suitable ones were used and a concept design was created. With its innovative design, the shaking movement has been viewed from a different angle and a form that can easily attract attention in the market has been achieved. Adding value to the packaging and being used as a toy after consumption may affect the preference of the product. An ergonomically suitable form for children's motor skills is emphasized. A different option suitable for the target audience has been presented to the standardized market.

### Makale Bilgisi

Araştırma makalesi  
Başvuru: 18/10/2020  
Düzeltilme: 01/03/2021  
Kabul: 08/03/2021

### Keywords

TRIZ  
Packaging Design  
Creative Thinking  
Techniques  
Product Design

### Anahtar Kelimeler

TRIZ  
Ambalaj Tasarımı  
Yaratıcı Düşünme  
Teknikleri  
Ürün Tasarımı

## Çocuklara Yönelik Ayran Ambalajının Yeniden Tasarımı

### Öz

Ambalaj tasarımı günümüz tüketim çağında firmalar için oldukça önemli bir konuma sahiptir. Raflarda bir arada belirlenmiş bir düzene göre sergilenen ambalajlar birbirleri ile rekabet içerisinde olan firmaların temsilcileridir. Bu ürünler doğru hedef kitesine ulaşmadığı sürece görevini yerine getiremez. Bu sebeple hedef kitesinin belirlenmesi ve ona yönelik tasarımlar sunulması ürünün başarılı olması için oldukça önemlidir. Bu çalışmada ayran ambalajları incelenmiştir. Hedef kitlesi çok geniş bir skalada tutulan ürünün, çocukların kullanımına yönelik algı yönetiminin yeterli olmadığı görülmektedir. Bunun için sık kullanılan ambalaj formları analiz edilmiş ve çocukların kullanırken yaşadığı sorunlar listelenmiştir. Sorun tespiti için TRIZ (Theory of Inventive Problem Solving) kullanılmıştır. Fonksiyon analizi sonucu ortaya çıkan ve çözülmesi gerekli olan sorunlara, çelişkiler matrisi ile çözüm yolları sunulmuştur. Bu yollar içerisinde uygun görülenler kullanılmış ve konsept tasarım oluşturulmuştur. Yenilikçi tasarımı ile çalkalama hareketine farklı bir açıdan bakılmış ve pazarda kolaylıkla dikkat çekebilecek bir forma ulaşılmıştır. Ambalaja değer katılarak tüketim sonrası oyuncak olarak da kullanılabilmesi ürünün tercih edilmesine etki edebilmektedir. Ergonomik olarak çocukların motor becerilerine uygun olan form üzerinde durulmuştur. Standartlaşan piyasaya hedef kitesine uygun farklı bir seçenek sunulmuştur.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Ambalajın ortaya çıkışı, insanlığın özellikle yiyeceklerini taşıma ve koruma ihtiyacıyla başlamıştır. Arkeolojik bulgular, M.Ö. 8000 yıllarında, ağaç kabuğu, yapraklar, deniz kabukları, kil çömlek gibi doğal malzemelerin ürünleri saklamak için kullanıldığını göstermektedir. Ancak bugün, içi boş meyve/sebze kabukları yerini cam şişelere; hayvan derileri ve yapraklar ise kâğıt ve plastik torbalara bırakmıştır [1].1823 yılında İngiliz Peter Durand, sac levhadan yapılmış ilk metal ambalaj olan "canister" in patentini

almıştır. Çift dikişli üç parçalı teneke kutu 1900 yılında kullanılmaya başlanmıştır. Kâğıt ve karton 1900'lü yıllarda önemli ambalaj malzemeleri haline gelmişlerdir. Plastik'in keşfedilmesiyle birlikte kâğıt ambalajın yerini alacak ambalaj malzemesi olarak kullanılmaya başlanmıştır [2]. Ambalaj tasarımı ürünün pazarlama stratejisinin temel unsurlarından biridir ve ürünün tüketici tarafından diğer ürünlerden farklılaşarak tanınmasını sağlayacak olan görsel yüzüdür [3]. Bunun için form, yapı, malzeme, tipografi, renk ve imge gibi ürün hakkında bilgi veren tasarım unsurlarının yaratıcı biçimde bir araya getirilmesi gerekmektedir [4]. Ambalaj, ürün ve potansiyel tüketici arasında doğru iletişim kurarken dikkat çekici olmalı ve kalıcı bir iz bırakabilmelidir. Bunu yaparken aslında tüketiciyi kendine bağlamalı ve onun sadakatini kazanmalıdır [5]. Ambalajın etkisini sürdürebilmesi için bazen büyük değişiklikler, bazen de günün tasarım getirileri doğrultusunda küçük ama etkili değişimlerin yeterli olacağı düşünülebilir. Piyasaya ilk defa çıkacak olan yeni ürün ambalajı tasarımının ise tüketici ile ilk karşılaşmasında onu etkileyebilmesi gerekmektedir. Tadını, kokusunu, rengini bilmediği yeni bir ürünü satın alma kararını verecek olan tüketiciyi etkileyen en önemli unsurlar, ambalaj tasarımının iletişim başarısı, görsel etkisi ve güncel tasarım yaklaşımlarını yakalayabilmiş olmasıdır [5]. Bu bakış açısı, ambalajlamanın, pazarlamanın ayrılmaz ve bütünü, tamamlayıcı bir parçası olarak görülmesine sebeptir. Bu bakımdan ambalaj pazarlama karmasına ait diğer elemanları etkilemekte ve onlardan etkilenmektedir [6]. Tüketim bilinci ve farkındalığının dünya genelinde artması, tüketici alışkanlıklarının değişmesine neden olurken özellikle sürdürülebilir ambalaj tasarımı bu noktada yükselen bir değer olarak karşımıza çıkmaktadır. Sürdürülebilir yaklaşım, ambalaj tasarımı sürecini daha karmaşık hale getirirse de ekolojik denge ve geri kazanım düşünüldüğünde bu durumunun göz ardı edilebilir [7]. Bu çalışmada tasarlanan ürün sürdürülebilir bir ambalaj olması için değer katılmış ve tüketim sonrası ambalajın oyuncak olarak kullanılması önerilmiştir. Oyuncak ambalajlar, ambalajların yaşantımızın her safhasında olduğunu gösterir önemli örneklerdir. Oyun, tüm canlılara has bir güdü olmasına karşın, tasarlanmış oyuncak insanlara özel bir araçtır. Ambalajlar, oyuncak formuyla bu insani duyguyu kullanabilmektedir. Tüketici, tüm insani duygularının etkisinde olduğu ambalaja, sıradan bir obje yerine, canlı ve dostça bir yaklaşım sergiler [8]. Bu yaklaşım çocuklara hitap konusunda avantaj sağlamaktadır. Tüketici beklentileri söz konusu olduğunda, karmaşık veya yoğun malzeme kullanımı ile yapılan ambalajlar yerine minimal tasarımların tercih edildiği görülmektedir [9]. Yalın ve minimal tasarımlar ürünün raflarda hızlıca anlaşılır kılınmasında önemli bir tercihtir. Tüketicinin ürün tercihi sırasında raflarda dizilen ürünler ile birçok gösterge ve yönlendirmeye maruz kalmaktadır ve bu seçim sürecini zorlaştırmaktadır. Ürünün karmaşık tasarımı satın almaya karar verilen süre için fazla bilgi ve yönlendirme içerdiğinde tüketici ile sağlıklı iletişim kurulamaz ve ürün eğer önceden deneyimlenmediyse tercih edilmez. Gereksiz ayrıntılar seçiciliği azaltır ve algılamaya engel olur. Bu da alım tercihini olumsuz etkiler [8]. DuPuis ve Silva (2008), ambalajın pazarlama açısından önemini açıklarken "Aslında pazarlamacılar alışveriş esnasında bir ürünle karşı karşıya gelinişin ilk üç dakikasından yedi dakikasına kadarki süreçte göz gezdirici konumundaki potansiyel tüketiciyi satın alıcıya dönüştürme şansına sahiptir. Bunu yapmanın yolu tüketicinin duygularına, değerlerine ve duygularına hitap edebilmekten geçer" diyerek Hekkert ve Schifferstein'la benzer kavramlardan bahsetmiştir [10]. Önerilen yeni ambalaj fikrinde tüketiciye ulaştırılacak ürün olan ayran ülkemize özgü geleneksel bir süt ürünüdür. Yabancı literatürlerde 'içilebilir yoğurt (drinking yogurt)' adı altında yer alan çok farklı ayran benzeri fermente ürünlere de rastlanmaktadır. Bu ürünler, ayrandan farklı olarak tüketici beğenisini artırmak amacıyla aroma, tatlandırıcı ve renk maddeleri veya meyve şurupları ilave edilerek üretilmektedir. Yoğurda belirli oranda su eklenerek oluşturulan ayran; protein, kalsiyum, fosfor, vitamin B2 (riboflavin), vitamin B1 (tiyamin), ve vitamin B12 içeriği bakımından oldukça zengin bir üründür [11]. Bu besin değerlerinin gelişim çağında düzenli olarak tüketilmesine teşvik amaçlı ayran ambalajı üzerinde çalışılmaya karar verilmiştir. Hedef kitlesi çok geniş bir skalada tutulan ürün, tüketim sırasında ortaya çıkan çocuk ergonomisine uygun olmayan kullanım ihtiyaçlarını karşılayamamaktadır. Piyasada yaygın olarak tercih edilen bardak formu referans olarak belirlenip TRIZ yöntemi ile yeniden tasarlanmıştır. Triz Genrich Altshuller tarafından ortaya konulmuştur. Teoriya Resheniya Izobretatelskikh Zadatch (ТеорияРешенияИзобретательскихЗадач) kelimelerinin baş harflerinden ortaya çıkmıştır. TRIZ içinde çok sayıda teknikleri barındıran sistematik fikir üretme topluluğudur. Altshuller 1946'da patent subayı olarak atandıktan sonra çok sayıda patent incelemiş ve bu patentlerin arkasındaki temel fikirleri yakalayıp TRIZ' in ortaya çıkmasını sağlamıştır [12]. TRIZ düşünme sürecinde yaşanan psikolojik ataletin üstesinden gelerek yaratıcı çözümler elde edilmesine yardımcı olan sistematik bir yöntemdir [13-14-15]. TRIZ inovatif fikirlerin ortaya çıkmasında etkin bir şekilde kullanılan ve bu fikirlerin doğuşunu kolaylaştıran bir metodolojidir [16-17]. TRIZ

yönteminin temeli, tasarımda karşılaşılabilecek tüm çelişkilerin ve bunlara sunulan çözümlerin incelenmesine dayanmaktadır. Sistemin faydalı işlevleri artırılarak ve zararlı işlevleri azaltılarak sistemler ideale yaklaştırılır. Sistemdeki parçalar en aza indirilerek, kaynaklardan faydalanarak, kimyasal, fiziksel ve geometrik etkiler kullanılarak karmaşıklık oluşturmadan sistem ideallığe yaklaştırılır [18]. Bu sebeple TRIZ metodu uygulanırken öncelikle çelişkilerin tanımlanması gerekmektedir. Altshuller patent araştırmalarını yaparken kütle, basınç, dayanıklılık gibi 39 teknik parametre tanımlamıştır. Altshuller'in geliştirdiği bu yöntemde, parametrelerden birinin iyileştirilmesi, başka bir parametrenin kötüleşmesine sebep olmasıyla mümkündür [19]. Altshuller yaratıcı / yenilikçi problemi, çözümün diğer bir problemin ortaya çıkmasını sağlaması olarak tanımlamıştır. TRIZ' de direk doğru çözüme ulaşmak mümkündür. Bunun için, TRIZ' in temelini oluşturan prensipleri uygulamak gerekir. Herhangi bir yaratıda asıl değişen düşünce sistemi ya da modelidir, dolayısıyla asıl mücadele alanı bakış alanının genişletilmesidir [20]. TRIZ, tasarımcının alternatif çözüm alanını genişlettiğinden dolayı, artan ürün karmaşıklığı, ürün tasarımında sektörel geçişler ve yeni malzemeler açısından ürün tasarımı için etkin bir araçtır. Sonuca deneme yanılma yerine metod ve yöntem temelli yaklaşımı; rekabetçi üstünlük açısından Ar-Ge, tasarım ve dolayısı ile üretim maliyetlerini ve sürelerini düşürme potansiyeline de sahiptir [21].

Bu çalışma ile çocuklara hazır paket olarak sunulan içeceklerden ayran ambalajının tercih önceliğini arttırabilecek bir ambalaj tasarımı hedeflenmiştir. Bu bağlamda piyasada üretici firmaların en çok tercih ettiği bardak formundaki ambalaj referans alınarak kullanıcıların karşılaştıkları sorunlar listelenmiştir. Fonksiyon analizi ile ürünün problemleri formülze edilmiştir. Ürünün, üretim sürecinden son kullanıcıya kadar olan süreçte karşıladığı fonksiyonlar ve bu fonksiyonların etkileşimleri şematik olarak anlatılmıştır. Bu ilişkiler sonucunda bir veya birden fazla çelişki barındıran fonksiyonlar tespit edilmiştir. Çelişki bir sistemin bir niteliğinin ilerletilmesi ya da değerinin artırılması için yapılan bir girişimin, bir diğer sistem niteliğinin değerini düşürmesidir [22]. Elde edilen teknik çelişkiler ürünün değerini olumsuz etkileyen fonksiyonlardır. Bu problemlere çözüm üretilmesi için kullanılan çelişkiler matrisindeki ikili kombinasyonlara başvurulmuştur. Bu kombinasyonlar sonucu önerilen yaratıcı prensipler incelenmiştir. Bu prensipler doğrultusunda çelişkilerin giderilmesi için eskiz çalışmalarına başlanmıştır. Eskizler sonucunda yeni bir ambalaj tasarım fikri elde edilmiştir. Bu ambalaj sürdürülebilirliği de desteklemesi ve değer kazanması için tüketim sonrası oyuncak olarak kullanılmasına yönelik grafik tasarım ile desteklenmiştir.

## 2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL AND METHOD)

Bu çalışma kapsamında TRIZ araçlarından çelişki matrisi tanıtılmış ve tasarım problem çözümlerinde nasıl kullanıldığı gösterilmiştir. Çelişki matrisinin yukarıdan aşağıya ilk satır hücrelerinde ve soldan sağa ilk sütun hücrelerinde 39 mühendislik parametresi yer alır. Bu parametrelerden yukarıdan aşağıya yer alanlar tasarımda iyileşmesi (yer alması) istenilen parametreleri ifade ederken; soldan sağa yer alanlar ise tasarımı zayıflatan ve istenmeyen parametreleri belirtir [23]. Örneğin; tasarımda (bir parçaya ait) dayanım artırılmak istendiğinde bu durum parça ağırlığını da artırabilir. Burada dayanım istenilen bir özellik iken ağırlık istenmez ve bu durum ise bir çelişki (zıtlık, tezat) oluşturur [24]. 39 TRIZ mühendislik parametresi Tablo 1' de verilmiş olup bu parametrelerle çelişki/zıtlık oluşturan tasarım problemlerinin hemen hemen tamamına yakını ifade edilebilir [22]. TRIZ' de çelişki şeklinde ifade edilecek tasarım problem çözümlerinde kullanılan 40 yaratıcı çözüm ilkesi vardır (Tablo 2). TRIZ' de şu iki tür çelişki yer almaktadır: (1) Teknik çelişki ve (2) Fiziksel çelişki. Teknik çelişki, tasarımda iyileştirilmek istenilen bir parametre sistemde istenmeyen olumsuz bir etkiye veya soruna neden olabilir. Tezat içeren bu istenilen ve istenmeyen etkiler (çelişkiler) 39 mühendislik parametresi cinsinden belirlenip Çelişki matrisinde ilk sütunda ve ilk satırda bu parametrelerin seçilip kesiştirilmesi ile elde edilen hücrede çözümler yer alacaktır. Yani bu çözüm hücresinde 40 yaratıcı çözüm ilkesi cinsinden 4 çözüm olacaktır. Bu 4 yaratıcı çözümden birinden birisi çok büyük bir olasılıkla mevcut tasarım çelişkisini çözecektir. (2) Fiziksel çelişki ise tasarlanan sistemde aynı parametrenin hem olması hem de olmaması halini içerir (matristeki soldan sağ köşeyi birleştiren hücreler). Yani bir şeyin hem uzun hem kısa olması hem sıcak hem soğuk olması hem sert hem yumuşak olması gibi. Bu çelişki halinde şu dört stratejiden biri uygulanmalıdır: zamanda ayırma, mekânda ayırma, bütün ve parçaları arasında ayırma ve duruma göre ayırma.

**Tablo 1. Teknik çelişki oluşturan 39 mühendislik parametresi [24]**

Mühendislik parametresi							
1	Hareketli cismin ağırlığı	11	Gerilme/ Basınç	21	Güç	31	Zararlı yan etkiler
2	Hareketsiz cismin ağırlığı	12	Şekil	22	Enerji kaybı	32	İmalat kolaylığı
3	Hareketli cismin uzunluğu	13	Cismin değişmezliği	23	Madde kaybı	33	Kullanım kolaylığı
4	Hareketsiz cismin uzunluğu	14	Mukavemet	24	Bilgi kaybı	34	Onarım kolaylığı
5	Hareketli cismin alanı	15	Hareketli cismin dayanımı	25	Zaman kaybı	35	Adapte edilebilirlik
6	Hareketsiz cismin alanı	16	Hareketsiz cismin dayanımı	26	Madde miktarı	36	Cihaz karmaşıklığı
7	Hareketli cismin hacmi	17	Isı	27	Güvenilirlik	37	Kontrol karmaşıklığı
8	Hareketsiz cismin hacmi	18	Parlaklık	28	Ölçüm güvenilirliği	38	Otomasyon düzeyi
9	Hız	19	Hareketli cismin harcadığı enerji	29	İmalat güvenilirliği	39	Verimlilik
10	Kuvvet	20	Hareketsiz cismin harcadığı enerji	30	Cisme zarar veren faktörler		

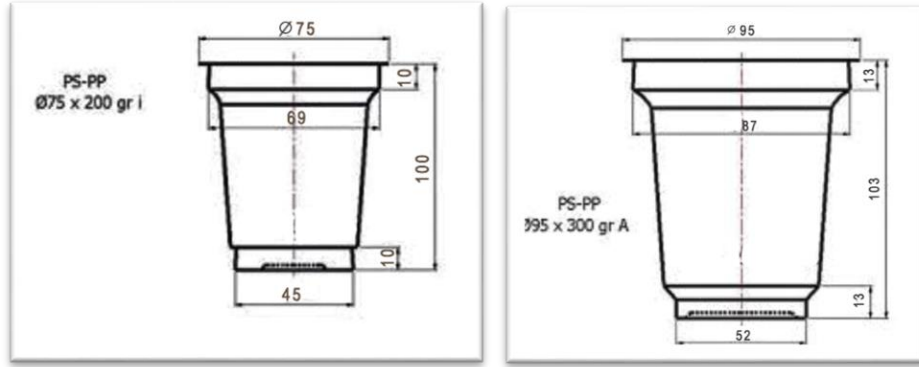
**Tablo 2. Teknik çelişkilerin çözümü için 40 yaratıcı ilke [24]**

Yaratıcı Prensip							
1	Bölümleme	11	Önceden yastıklama	21	Hızlı hareket etme	31	Gözenekli malzeme kullanma
2	Çekip çıkarma	12	Eş mümkün olay	22	Zararı faydaya dönüştürme	32	Renk değiştirme
3	Yerel nitelik	13	Tersine çevirme	23	Geribildirim	33	Türdeşlik
4	Asimetri	14	Küremsi hale getirme	24	Arabulucu	34	Parçaları reddetme ya da yenileme
5	Birleştirme	15	Dinamiklik	25	Selfservis	35	Parametre değiştirme
6	Evensellik	16	Kısmi veya gereğinden fazla hareket	26	Kopyalama	36	Faz geçişi
7	Yuvalama	17	Yeni boyuta geçme	27	Ucuz ve kısa ömürlü cisimler kullanma	37	Isıl genleşme
8	Karşıt ağırlık	18	Mekanik titreşim	28	Mekanik sistemin değiştirilmesi	38	Güçlü oksitleyici
9	Önceden karşı hareket	19	Periyodik hareket	29	Gaz ve sıvı kullanma	39	Atıl ortam
10	Önceki hareket	20	Faydalı hareketin devamlılığı	30	Esnek film ve ince zarlar kullanma	40	Bileşik malzemeler

### 3. İYİLEŞTİRME VE TEKRAR TASARIM ÇALIŞMALARI (IMPROVEMENT AND RE-DESIGN STUDIES)

#### 3.1 Mevcut Durum (Current State)

Standart bardak şeklindeki ayran ambalajları market, bakkal ve çeşitli satış mağazalarında içerisindeki ayranı saklamak ve müşteriye ulaştırmak amaçlı kullanılmaktadır (Bkz.Şekil 1). Ambalaj sektöründeki 3S (saklama, koruma, pazarlama) kuralına göre tasarlanıp üretilmiştir. Dolum işleminin gerçekleştiği ayrıca içmek için kullanılan bardak ağzı bölümünden ve tüketim esnasında el ile tutulan açılı silindirik gövdeden oluşmaktadır.



Şekil 1. Mevcut ürün [25]

Mevcut üründe hedef kitle çok geniş tutulmuştur, satışının sürekli olması için reklam yüzü olarak genelde gençler kullanılmıştır. Buna karşın çocukların içmesi teşvik edilmemiş ve buna uygun bir ürün tasarlanmamıştır. Hedef kitlesinin özelliklerini geniş anlamda ele alan ve buna yönelik ambalaj sunan bu içecekte, çocuklar hedef kitlesindeki bu standart ölçüler sebebiyle kendilerine uygun olmayan ürünleri kullanmak zorundadır. Çocuklara hitap eden ve her gün dikkatlerini çekmek için yeni yöntemler arayan sağlıksız içeceklerle başa çıkabilmek ve sektörde daha fazla paya sahip olabilmek için çocukların ihtiyaçlarını doğru okumak önemlidir.

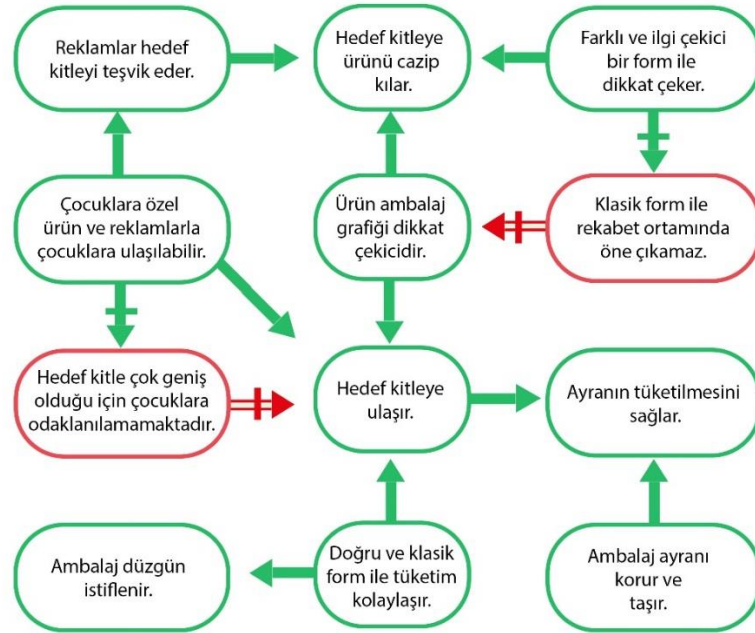
Yetişkin bireylerin el yapısına uygun olarak tasarlanan ayran ambalajını kullanan çocukların karşılaştıkları sorunlar aşağıda sıralanmıştır;

1. Ambalajı gövdesinden tutarken iki elini kullanmak zorundadır.
2. Ambalajın ağız kısmı çok geniş olduğundan içmekte sorun yaşamaktadır.
3. Ambalajın ağız kısmı geniş olduğundan üzerine dökmektedir ve bu durum ebeveyn açısından sıkıntılıdır. Bu tercih edilmeme sebebi olarak gösterilebilir.
4. İlgi çekici olmaması sebebiyle raflardaki ürünleri inceleyen çocuklar renkli ve dikkat çekici olan ve genellikle asitli olan içeceklere yönelmektedir. Bu durum çocuk sağlığını olumsuz etkilemektedir.
5. İnce et kalınlığı yüzünden kuvvet uygulanan gövde yüzeyinde kırılmalar olmakta ve bardağın dengesi, yapısı bozulmaktadır.
6. Mevcut ürün hafiftir ve silindirik yapısı sebebiyle tüketilirken kolay tutulmaktadır. Fakat çocuklar için bu durum dezavantajdır.

Piyasada genel olarak bulunan ayran ambalajı tasarımları bardak şeklindedir. Bu bardaklar gövdesi geniş, açılı ve düz olarak bulunabilir. Bunlardan farklı olarak Süttaş markasının 'genç şişe' olarak isimlendirdiği bir tasarımı mevcuttur. Bu ürünler grafiksel anlamda çocukların dikkatini çekme olasılığının yanında biçim olarak oldukça sıradandır. Çocuklara hitap eden ve özellikle belli bir maskotu olan markaların ürünleri incelendiğinde grafiksel açıdan dikkat çekici olsalar da formlarında bir yenilik görülemez. Ticari olarak piyasada en çok bilinen markalar pazarda daha iddialı ürünlerle bulunmakta ve dikkat çekmektedir. Tasarlanacak ürün en az bu ürünlerle yarışacak derecede dikkat çekici olmalıdır.

### 3.2. Fonksiyonel Analiz (Functional Analysis)

Fonksiyon analizi problem çözme ve konsept geliştirmek için kullanılır. İyi tasarlanmış analiz şeması sistemdeki sorunların tespitinde ve doğru çözüme ulaşmada önemlidir. Fonksiyon analizi ile ürünün problemleri formülize edilir ve ürünün, üretim sürecinden son kullanıcıya kadar olan süreçte karşıladığı fonksiyonlar ve bu fonksiyonların etkileşimleri şematik olarak anlatılır (Bkz Şekil 2). Bu ilişkiler sonucunda bir veya birden fazla çelişki barındıran fonksiyonlar tespit edilir. Fonksiyonun çelişki olup olmadığı kullanılan oklar yardımı ile anlaşılmaktadır. "→" kullanıldığında fonksiyonun diğer fonksiyona fayda sağladığı ve iyi sonuçlar ürettiği, "⇒" kullanıldığında fonksiyonun diğer fonksiyonu olumsuz etkilediği ve kötü sonuçlar ürettiği, "⇔" kullanıldığında fonksiyonun diğer fonksiyondaki iyi sonucu olumsuz etkilediği ve kötü sonuçlar elde ettiği, "⇨" kullanıldığında fonksiyonun diğer fonksiyondaki kötü sonucu olumlu etkilediği ve zararlı durumu iyileştirdiği veya durdurduğu anlaşılmaktadır. Elde edilen teknik çelişkiler ürünün değerini olumsuz etkileyen fonksiyonlardır. Yapılan fonksiyon analizinde hedef kitlenin çok geniş olduğu bu sebeple çocuklara hitap konusunda yetersiz kalındığı ayrıca klasik form ile rekabet ortamında dikkat çekmeye çalışmanın ürüne fayda sağlamadığı sonucu elde edilmiştir.



Şekil 2. Fonksiyon Analizi

### 3.3 Çelişkiler Matrisi ve Uygulaması (Contradictions Matrix and Its Implementation)

Elde edilen problemlere çözüm üretilmesi için çelişkiler matrisindeki ikili kombinasyonlara başvurulmuştur (Bkz. Tablo 3). Bu kombinasyon sonucu önerilen yaratıcı prensipler incelenmiştir. Prensipler doğrultusunda çelişkilerin giderilmesi için eskiz çalışmalarına başlanmıştır (Bkz. Şekil 3 ve 4). Eskizler sonucunda yeni bir ambalaj tasarım fikri elde edilmiştir (Bkz. Şekil 5). Bu ambalaj sürdürülebilirliği desteklemesi, değer kazanması ve dikkat çekmesi için tüketim sonrası oyuncak olarak kullanılmasına yönelik grafik tasarım ile desteklenmiştir.



**Tablo 3. Teknik çelişkilerin çözümü için 40 yaratıcı ilke**

<b>İyileşen faktör</b>	<b>Kötüleştiren faktör</b>	<b>13 Nesnenin dengesi</b>
14 Dayanıklılık, güç		13, 17, 35
12- Şekil		33, 1, 18, 4

Ürün ambalajının klasik ve bilinen bir formda olması üretilmesinde ve maliyetinde yarar sağlamaktadır. Mevcut ambalaj uygun ve basittir buna karşın sıradandır. Bu dikkat çekiciliği azaltan bir unsurdur. Bu ayrıca pazarda sadece grafiklerle ve maliyetlerle öne çıkabileceği anlamına gelmektedir. Fakat çocuklara ürünü arzulamak ve meraklandırmak fiyat uygunluğu ile sağlanabilecek bir konu değildir. Formda değişikliğe gidilmesi durumunda rekabet ortamında ön plana çıkmak kolaylaşabilir. Dikkat çekici ürün çocuklara hitap eder ve ürün satışı fiyat fazlalığına rağmen gerçekleştirilebilir. Getirilen yeniliklere karşın ambalajın sağladığı olumlu durumlar korunmalıdır. Ambalaj ürünü saklamalı ve muhafaza etmelidir ayrıca kolay istiflenme özelliğini de korumalıdır.

**Tablo 4. Çelişki 1**

<b>IFR (Ideal Final Result) İdeal Nihai Sonuç</b>	Ambalaj, çocuklar kuvvet uyguladığı zaman ezilmekten ve denge kaybindan korunur, ancak et kalınlığı ve malzeme mevcut durumunu korur.
<b>Çelişki</b>	Çocuklar kullanmak için aynı yerlere kuvvet uygulamalıdır. Ambalaj kuvvet uygulanan yüzeylerden kırılmamalıdır.
<b>Çelişkiler matrisindeki kombinasyonlar sonucu önerilen tasarım prensiplerinin sunduğu çözüm önerileri</b>	13 Tersine çevirme; Problemi çözmek için kullanılan eylemi ters çevirin, hareketli parçaları (veya ortamı) sabitleyin, sabit parçaları hareketlendirin, cismi (veya süreci) ters çevirin. 17 Yeniden boyutlama; Cismi iki veya üç boyutlu uzayda hareket ettirin, cisimleri tek katlı yerine çok katlı olarak düzenleyin, cismi eğin, yönünü değiştirin veya yana yatırın, verilen alanın diğer tarafını kullanın. 35 Fiziksel ya da kimyasal durum; Cismin fiziksel durumunu (katı, sıvı, gaz) değiştirin, cismin yoğunluğunu veya kıvamını değiştirin, cismin esneklik düzeyini değiştirin, cismin sıcaklığını değiştirin.

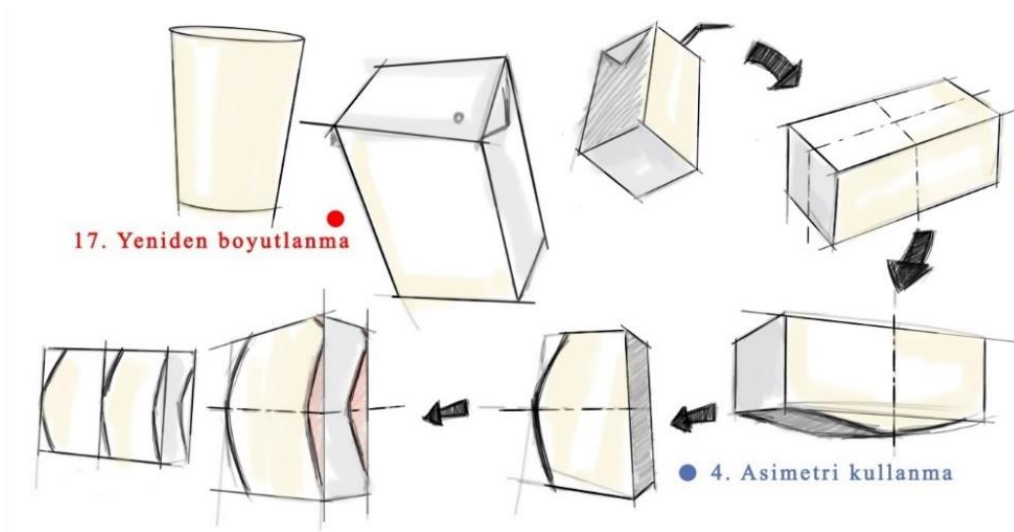
**Tablo 5. Çelişki 2**

<b>IFR (Ideal Final Result) İdeal Nihai Sonuç</b>	Ambalaj, çocukların dikkatini çekmek için hareketli olur, ancak raflarda sergilenmesi ve istiflenmesi için mevcut sabit durma özelliğini korur.
<b>Çelişki</b>	Ambalaj rafta sabit olmalıdır. Ambalaj dikkat çekici olmak için hareketli olmalı, sabit olmamalıdır.
<b>Çelişkiler matrisindeki kombinasyonlar sonucu önerilen tasarım prensiplerinin sunduğu çözüm önerileri</b>	33 Homojenlik; Cismi etkileyenleri, cisimle aynı malzemeden yapın. 1 Bölümleme; Cismi bağımsız parçalara bölün, cismi kolay sökülebilir hale getirin, cismin bölüm ve parça sayısını artırın. 18 Mekanik titreşim; Cismin sallanmasını veya titremesini sağlayın, frekansı artırın, cismin rezonans frekansını kullanın, mekanik yerine piezoelektrik titreştirici kullanın, ultrasonik ve elektromanyetik alan osilasyonlarını birlikte kullanın. 4 Asimetri; Cismin simetrik yapısını asimetric hale getirin, cismin asimetri seviyesini artırın.

Toplamda yedi adet önerilen çözüm içerisinde, dört adet çözüm önerisi kullanılmıştır. Kullanılan özellikler ve kullanım alanları aşağıda belirtilmiştir.

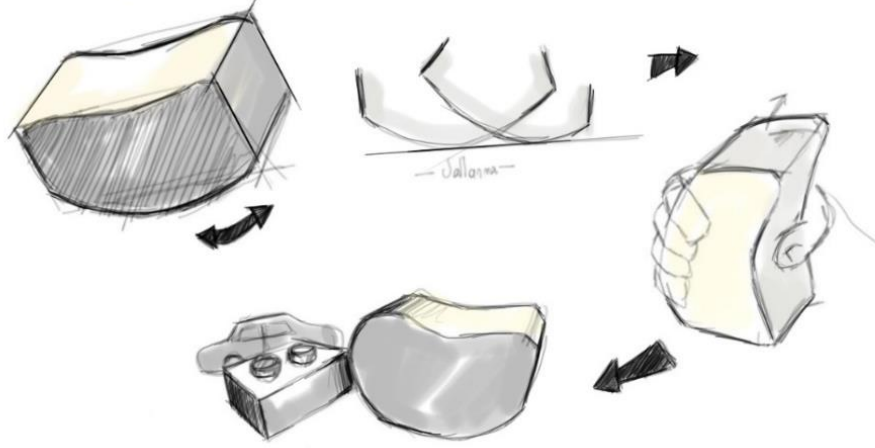
- 17 Yeniden boyutlama; Ürün yalnızca dik konumlandırılabilirken yapılan yenilik sonucu yatay olarak da kullanılabilir. Çalkalama hareketi ve kullanım sonrasında oyuncak olarak kullanımı sağlanmıştır.
- 4 Asimetri; Ürünün simetrik yapısı değiştirilmiş ve ergonomik bir tutuş için eğim verilmiştir. Bu yüzey sayesinde elde kayması önlenmiştir ve tek elle kontrolü sağlanmıştır. Bu durum istiflenmesinde bir sorun yaratmamaktadır. Yan yana dizilen ürünler bir parça gibi birleşerek ölü alan bırakmamaktadır. Ayrıca ürün kullanımı esnasında uygulanan kuvvet yüzünden yaşanan denge kaybı sorunu bu yöntem ile giderilmiştir.
- 13 Tersine çevirme; Sabit olan ambalaja sıradanlık problemini ortadan kaldırmak için hareket katılmıştır. Bu hareket düz yüzeylere eğim verilerek elde edilmiştir. Sallanma hareketine ise 14 numaralı buluş yöntemi ile karar verilmiştir. Piyasadakilerden farklı bir şekilde tasarlanan ambalaj ile çalkalama hareketine yenilik getirilmiştir. Hem sabit hem hareketli olarak iki şekilde kullanılabilen ürün istekleri karşılamaktadır.
- 18 Mekanik titreşim; Ambalaj dikkat çekici olması ve kullanımından sonra oyuncak olarak da kullanılabilmesi için sallanması sağlanmıştır. Dikdörtgen bir kutunun uzun kenarına verilen eğim ile ürün sallanabilir duruma getirilmiştir.

Çalışma kapsamında önerilen değişikliklerin eskiz çalışmaları gerçekleştirilmiş (Bkz. Şekil 3 ve 4).



Şekil 3. Eskiz aşaması 1

● 13. Ters eylem kullanılmıştır.



● 18. Mekanik titreşim kullanılmıştır

Şekil 4. Eskiz aşaması 2



Şekil 5. Grafik Tasarımı

Ambalaj, üzerinde barındırdığı amblem, fotoğraf, resimleme, renk ve tipografi gibi grafik öğeler sayesinde hem söylemek istediklerini iletir hem de farkındalık yaratmak için gerekli olanı sunmayı amaçlar. Özellikle gıda sektöründe var olan ambalaj tasarımları tüketiciyi etkileyebilme durumunu olumlu yönde kullanabilmelidir [26]. Bu nedenle grafik tasarımı da form ile bağlantılı olarak tasarlanmıştır.



Şekil 6. Kullanım Senaryosu



Şekil 7. Raf Dizimi

#### 4. BULGULAR TARTIŞMA VE SONUÇ (RESULTS, DISCUSSION AND CONCLUSION)

Ambalaj tasarımında hedef kitleye ulaşmak ve ürün satmak için sistemdeki eksiklerin ve yanlışların bulunması gereklidir. Bu çalışmada hedef kitlenin geniş olması nedeniyle hitap edilemeyen çocuklara yönelik bir ürün tasarlanmıştır. TRIZ yöntemi ve çelişki matrisi kullanılmıştır. Konsept tasarım ile mevcut kullanılan ürün arasında çeşitli ortak yanlar ve farklılıklar tespit edilmiştir. Çocukların motor becerilerine hitap etmeyen sıradan bardak formundaki tasarımın eksiklikleri, konsept tasarımda giderilmeye çalışılmıştır. Tutma eylemini kolaylaştırması amacıyla ergonomik olarak düzenlenmiş form motor becerilerine uygun olarak düşünülmüştür (Bkz. Şekil 6). Raflarda istifleme düzeni ve rafta bulunan ürünlerin sayısında bir azalma olmamakla birlikte, iç içe geçen yapısı sayesinde ölü alanlar değerlendirilmiştir (Bkz. Şekil 7). Tasarım öncesi belirlenen sorunlar giderilmiştir. Sallanan formu sayesinde çalkalama işlemine farkı bir açıdan bakılmıştır. Sabit bir ürün hareketli ve aynı zamanda sabit olabilen bir ürüne dönüştürülmüştür. Bu farklılık çocukların dikkatini çekmekle birlikte tüketim sonrasında oyuncak olarak farklı şekillerde kullanılarak sürdürülebilirliği desteklemektedir bu durum mevcut üründe bulunmamaktadır. Ayrıca ambalaj toplu olanlarda kullanıldığında oldukça kolay bir şekilde dikkat çekerek etkili bir marka tanıtımına da olanak sağlamaktadır. Ulaşılan sonuç sonunda mevcut iyi durum korunmuş ve eksiklikler giderilerek daha avantajlı bir ürüne ulaşılmıştır. TRIZ gibi yaratıcı düşünme tekniklerinin eskiz ile desteklenmesinin verimli sonuçlar aldığı görülmüştür.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Klimchuk, M. R., Krasovec, S. A. *Packaging Design Successful Product Branding From Concept To Shelf*. New Jersey: John Wiley & Sons Ltd, 2006.
- [2] İnternet Sitesi: <http://www.ambalaj.org.tr/tr/ambalaj-ve-cevre-ambalajin-tarihcesi.html>
- [3] Ambrose, G., Harris, P. (2011). *Packaging The Brand: Exploring The Relationship Between Packaging Design and Brand Identity*. Switzerland: AVA Publishing.
- [4] Becer, E. (2014). *Ambalaj Tasarımı*. Ankara: Dost Kitabevi Yayınları.
- [5] İlisulu, T. (2019). *Gıda Ambalajı Tasarımlarında Değişen Tüketici Beklentileri*. Sanat- Tasarım Dergisi, (10), 16-23. DOI: 10.35333/Sanat.2019.84
- [6] Akpınar, M., Gül, M., Oral, M., Akay, A., Gülcan, S. (2015). *6. Meyve Suyu Ürünleri Satın Alma Tercihinde Ambalaj Faktörünün Değerlendirilmesi*. Dumlupınar Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi, (44), 0-0. Retrieved from <https://dergipark.org.tr/tr/pub/dpusbe/issue/4786/66041>
- [7] Verghese, K., Lewis, H., Fitzpatrick, L. (2012). *Packaging for Sustainability*. New York: Springer – Verlag London Limited.

- [8] Erdal, G. (2019). *Ambalajda Etkili Tasarım*. Uluslararası İnsan ve Sanat Araştırmaları Dergisi, 2 (2), 10-18. Retrieved from <https://dergipark.org.tr/tr/pub/ijhar/issue/52049/678871>
- [9] Theobald, N., Winder, B. (2006). *Packaging Closures and Sealing System*. Australia: Blackwell Publishing.
- [10] Gündoğdu, H. (2019) *Ambalaj Tasarımlarında Yaratıcılığın Önemi ve Algı Sorunları*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Aydın Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, İstanbul.
- [11] Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, (2020). Pamukova Meslek Yüksek Okulu, *Süt Teknolojisi Ders Sunumu*.
- [12] Kaya, M. (2018). *TRIZ ile Yenilikçi Mühendislik Eğitimi Tasarlama*. Üniversite Araştırmaları Dergisi, 1 (2), 58-61. DOI: 10.32329/uad.413706
- [13] Altshuller, G. (1999). *Innovation Algorithm TRIZ, Systematic Innovation and Technical Creativity*. Massachusetts, USA, Technical Innovation Center Inc.
- [14] Kapucu, S., Baykasoğlu, A., Dereli, T. (Haziran 2001). “*Toplam Kalite Yönetimi Uygulamalarında Kullanmak İçin Yenilikçi-Yaratıcı Problem Çözme Yaklaşımı: TRIZ*”. TMMOB Makina Mühendisleri Odası II. Kalite Sempozyumu, Bursa, Türkiye.
- [15] Lin, SY., Wu, CT. (2016). “*Application of TRIZ Inventive Principles to Innovate Recycling Machine*”. *Advances in Mechanical Engineering*, 8(5), 1-8.
- [16] Palčák, F. (2016). *Improvement of Dynamic Characteristics of The Car In The Light of Technological Evolution*, *Mechanisms and Machine Science* Vol.44, p. 391-397. DOI: 10.1007/978-3-319-44087-3\_53.
- [17] Başak, H., Şahin İ., Top N. (2018). *TRIZ Yaklaşımı Kullanılarak Havalimanı Bekleme Alanlarının Arttırılması*, Conference: 3’rd International Symposium on Industrial Design Engineering (ISIDE 2018), Antalya, Turkey.
- [18] Subran M, Hatipoğlu A, Fidanboylu K, Korkmaz F F., (Şubat 2020). “*Toplam kalite yönetimi uygulamalarında kullanmak için yenilikçi-yaratıcı problem çözme yaklaşımı: TRIZ*”. 4. Çukurova Uluslararası Bilimsel Araştırmalar Kongresi, Adana, Türkiye.
- [19] Kiraz, C, Başak, H, Top, N, Şahin, İ. (2020). *TRIZ Yaklaşımı Kullanılarak Yeni Bir Aydınlatma Elemanı Tasarımı*. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji, 8 (1), 109-120. DOI: 10.29109/gujsc.578579
- [20] Cemgil, S. (2006), *Eğitim Standartlarının Oluşturulmasında Ve Geliştirilmesinde Yaratıcı Problem Çözme Teorisi (TRIZ)*, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniv. Sosyal Bilimler Enstitüsü, İzmir.
- [21] Güneş, S. (2008). *Ürün Tasarımı ve TRIZ*. Sanat ve Tasarım Dergisi, 1 (2). Retrieved from <https://dergipark.org.tr/tr/pub/sanatvetasarim/issue/20665/220449>
- [22] Altshuller, G. (2002). *40 principles, TRIZ keys to innovation*: Technical Innovation Center, Inc.
- [23] TRIZ 40 Principles. (2019); Available from: [http://www.triz40.com/aff\\_Principles\\_TRIZ.php](http://www.triz40.com/aff_Principles_TRIZ.php)
- [24] Canbulut, F., Demiştas, B. (2019). *Tasarımda Beyin Fırtınası ve TRIZ Kullanımı: Baza Makas Kaldırma Sistemi Örnek Çalışması*. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji, 7 (3), 614-626. DOI: 10.29109/gujsc.581967
- [25] İnternet Sitesi: <http://www.tekmapolietilen.com.tr/urun/36/180-200-300-ml-ayran-bardagi.html>
- [26] İlisulu, T. (2012). *Gıda Ambalajı Tasarımlarında Marka ve Esinlenme*. Sanat Dergisi, 0 (21), 125-132. Retrieved from <https://dergipark.org.tr/tr/pub/ataunigsfd/issue/2609/33580>

## Investigation of the Effect of Stoichiometry Ratio on Two-Cell PEM Fuel Cell Stack Performance

 Muhammed Salih CELLEK<sup>1</sup>, Muhittin BİLGİLİ<sup>2,\*</sup>
<sup>1,2</sup>Gazi University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, 06570, Maltepe, ANKARA

### Graphical/Tabular Abstract

#### Article Info

Research article  
 Received:24/09/2020  
 Revision:27/01/2021  
 Accepted:17/02/2021

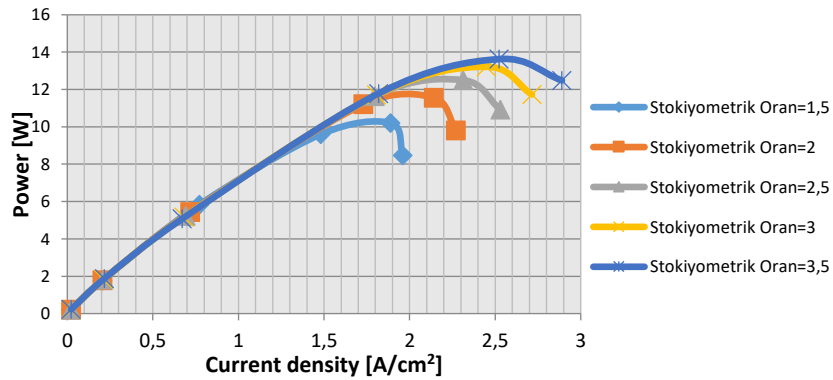
#### Highlights

- Effects of stoichiometry
- Analysis of PEM stack
- CFD Modelling

#### Keywords

Stoichiometry ratio  
 Polarization curves  
 PEM Fuel Cell Stack

Two PEM fuel cells are constructed as a stack and effects of stoichiometric ratio values on stack performance are studied by numerically. Stoichiometric ratio values for fuel cell stack is investigated as an important operating parameter. Numerical studies are carried out for certain anode and cathode stoichiometric ratio values. Effect of stoichiometry ratio values on the performance of the stack compared by plotting polarization curves for each case.



**Figure A.** Electrical power curves corresponding to stoichiometric values of PEMFC stack

**Purpose:** In this study, two units PEM fuel cells are designed and modelled to construct a stack. This fuel cell stack are numerically investigated by using different stoichiometric ratio values. At the selected stoichiometric ratio values (1.5, 2, 2.5, 3 and 3.5) analysis are carried out. Temperature distribution at the membrane, distribution of anode and cathode mass fractions contours within corresponding gas flow channels are also obtained for the prepared cases. Polarization curves and electrical power curves obtained and compared for these cases. Therefore, it is seen that stoichiometric ratio values are important operating parameter for fuel cell stack.

**Theory and Methods:** PEMFC stack model has been designed by CATIA V5R21. The designed cell stack model were investigated for selected anode and cathode stoichiometric values using CFD program named ANSYS FLUENT.

**Results:** For the selected stoichiometric ratio values (1.5, 2, 2.5, 3 and 3.5) numerical analysis are carried out for PEMFC stack in this study. Effects of stoichiometric ratio on performance of PEMFC stack is analyzed numerically. At the same time, when the stoichiometric values are increased, temperature distribution at the membrane became more homogeneous. It is concluded also that, anode and cathode mass fraction values increased and distribution of reactant gases inside the gas flow channel became more homogeneous for the increasing stoichiometric values.

**Conclusion:** It is seen that especially at high current density region of polarization curves for the increasing value of stoichiometric ratio, stack current density values also increased. However, effects of this increment ratio on the values of current density decreased when the stoichiometric values are increased.



## Investigation of the Effect of Stoichiometry Ratio on Two-Cell PEM Fuel Cell Stack Performance

Muhammed Salih CELLEK<sup>1</sup>, Muhittin BİLGİLİ<sup>2,\*</sup>

<sup>1,2</sup>Gazi University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, 06570, Maltepe, ANKARA

### Abstract

The importance of fossil fuels has increased with the use of steam energy in industry. But especially in recent days, the problem of global warming is being felt seriously in the world. The most important reason for this problem is harmful emissions caused by burning fossil fuels. The world has turned to various alternative energy sources in order to eliminate this problem. Interest in PEM fuel cells, which are among alternative the energy converters, has been increasing. In this study, the effect of stoichiometry ratio on the performance of two-cell PEM fuel cell stack was analyzed numerically. Two fuel cells each with an active area of 5.4 cm<sup>2</sup> were connected in series, and the gas flow channels were determined in parallel and stacked. Numerical analysis was performed with five different stoichiometry ratios (1.5, 2, 2.5, 3, and 3.5) at various cell voltage values (1 V, 1.2 V, 1.4 V, 1.6 V, 1.8 V). Polarization and power-current density curves were obtained for five different stoichiometry ratio values. In addition, in order to see the effect of the stoichiometry ratio on a constant voltage, temperature distribution of the membrane, the anode and the cathode mass fraction distributions formed by four different stoichiometric ratios at 1 Volt, where the maximum amount of power is obtained. With this study, it was observed that current density increased with the improvement in the stoichiometric ratio and the amount of this increment continued to decrease. The highest power value was obtained at the stoichiometric ratio of 3.5 and 1 V potential difference value. However, with the increasing stoichiometric ratio, it was concluded that hydrogen and oxygen distributions became more homogeneous in the anode and cathode channels while a limited increase in membrane temperature occurred.

### Makale Bilgisi

Araştırma makalesi  
 Başyuru: 24/09/2020  
 Düzeltilme: 27/01/2021  
 Kabul: 17/02/2021

### Keywords

Stoichiometry ratio  
 Polarization curves  
 PEM fuel cell stack

### Anahtar Kelimeler

Stokiyometrik oran  
 Polarizasyon eğrileri  
 PEM yakıt hücresi yığı

## Stokiyometri Oranının İki Hücreli PEM Yakıt Hücresi Yığını Performansına Etkisinin İncelenmesi

### Öz

Buhar enerjisinin sanayide kullanılmaya başlanmasıyla beraber fosil yakıtların önemi artmıştır. Fakat özellikle son günlerde küresel ısınma sorunu dünyada ciddi olarak hissedilmektedir. Bu sorunun en önemli sebebi de fosil yakıtların yakılmasıyla açığa çıkan zararlı emisyonlardır. Dünya bu sorunu ortadan kaldırmak amacıyla çeşitli alternatif enerji kaynaklarına yönelmiştir. Alternatif enerji dönüştürücüleri arasında yer alan PEM yakıt hücrelerine olan ilgi artmaktadır. Bu çalışmada, iki hücreli PEM yakıt hücresi yığını performansına stokiyometri oranının etkisi sayısal olarak incelenmiştir. Her biri 5,4 cm<sup>2</sup> aktif alana sahip iki yakıt hücresi seri bağlanarak gaz akış kanalları paralel olacak şekilde belirlenip yığın haline getirilmiştir. Sayısal hesaplamalar yapıp çeşitli potansiyel fark değerlerinde (1 V, 1,2 V, 1,4 V, 1,6 V, 1,8 V) beş farklı stokiyometri oranı ("1,5", "2", "2,5", "3", "3,5") kullanılarak sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Beş farklı stokiyometri değeri için polarizasyon eğrileri ve güç-akım yoğunluğu eğrileri elde edilmiştir. Ayrıca sabit bir voltajdaki stokiyometri oranının etkisini görebilmek için en fazla güç miktarının elde edildiği 1Volt değerinde dört farklı stokiyometrik oran ile oluşan membran sıcaklık dağılımı, anot kütle kesri dağılımı ve katot kütle kesrinin dağılımları elde edilmiştir. Bu çalışma ile stokiyometrik oranın artmasıyla birlikte akım yoğunluğunun arttığı, bu artış oranının azalarak devam ettiği görülmüştür. En yüksek güç değerine ise 3,5 stokiyometrik oranında ve 1 V değerinde ulaşılmıştır. Bununla birlikte artan stokiyometrik oranla beraber membran sıcaklığında kısıtlı artış gerçekleşirken anot ve katot kanallarında hidrojen ve oksijen dağılımlarının daha homojen hale geldiği görülmüştür.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Gelişen teknoloji, artan nüfus ve bunlara bağlı birçok nedenle beraber dünyada enerji ihtiyacı giderek artmaktadır. Bu ihtiyacı karşılayabilmek için fosil yakıt rezervleri uzun yıllardan beri kullanılmaktadır. Fakat azalan fosil enerji kaynaklarının artan talebe bir süre sonra yetmeyeceği düşünülmektedir. Bununla beraber bu tip yakıtlardan enerji üretilirken meydana gelen kirliliğin küresel ısınmaya sebep olması ve ekosisteme zarar vermesi bilim insanlarının alternatif enerji kaynaklarına yönelmelerine sebep olmaktadır.

Enerji ihtiyacını karşılamak için en verimli ve en ekonomik çözüm yollarını arayan bilim insanları, bugünün ve yarının enerji kaynağının hidrojen olduğunu düşünmekte [13], daha temiz bir çevre için PEM (Proton Exchange Membrane) yakıt hücresi üzerinde yoğunlaşarak bu konuda çeşitli araştırmalar yapmaktadır. Fosil yakıtların yanması sonucu açığa çıkan zararlı emisyonların aksine yakıt hücrelerinde meydana gelen reaksiyonlar sonucu yan ürün olarak sadece su oluşmaktadır. Bu nedenle yakıt hücreleri çevre dostu bir güç kaynağı olarak görülmektedir [12]. Ayrıca kimyasal enerjiyi doğrudan elektrik enerjisine çeviren PEM yakıt hücreleri yüksek güç yoğunluğu, yüksek enerji dönüşüm verimliliği ve çevre dostu olma gibi sayısız avantajlarından dolayı büyük bir öneme sahiptir [7].

Yapılan araştırmalar, hidrojenin diğer yakıt türlerine göre yaklaşık üç kat pahalı olduğunu ve yaygın bir enerji kaynağı olarak kullanılabilmesinin hidrojen üretiminin maliyetini düşürecek teknolojik gelişmelere bağlı olacağını ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, üretilen ihtiyaç fazlası elektrik enerjisinin hidrojen olarak depolanması günümüz için farklı bir seçenek olarak düşünülebilir. Bu şekilde depolanan enerjinin yaygın olarak kullanılabilmesi yakıt hücresine dayalı teknolojilerin geliştirilmesine bağlıdır [13].

Yakıt hücresi, elektrokimyasal reaksiyon yoluyla hidrojen ve oksijeni elektrik enerjisine dönüştüren bir elektrik jeneratörüdür. Yakıt hücresinde termodinamik verimlilik yaklaşık % 60'a ulaşırken bu oran geleneksel motorda sadece %30'dur. Elektrik gücü, anot yüzeyinde hidrojen moleküllerinin oksidasyon reaksiyonları sonucu oluşur [9]. PEM yakıt hücreleri anot ve katot olmak üzere iki adet elektrotla sahiptir. Bu elektrotlar polimer membran ile ayrılmışlardır. Bu tür yakıt pillerinde yakıt olarak hidrojen kullanılır ve hidrojen hücreye anot tarafından gönderilir. Anot elektrodunda platin katalizör varlığında protonlar ile serbest elektronlar ayrışır. Burada ayrışan elektronlar elektrik akımını oluştururken protonlar ise polimer elektrot membranı geçerek katot tarafına geçer. Dış çevrimden gelen ayrışan elektronlar, protonlar ve havadaki oksijen katot kutbunda saf su ve ısı üretmek üzere birleşmektedirler. Teorik bakımdan bir yakıt hücresi 1,23 V, gerçekte ise yaklaşık 1 V civarında elektrik potansiyeli üretir [1].

Yakıt hücresi performansına birçok faktör etki etmektedir. Bu faktörlerin etkilerinin incelendiği çalışmalar yapılmıştır. İki hücreli bir PEM yakıt pili yığınının analizinin sayısal olarak yapıldığı bir çalışmada PEM yakıt pillerinden elde edilen gücün hücre sayısına göre değişimi incelenmiştir. Bu çalışmada hücre sayısı ile birlikte elde edilen gücün arttığı ancak hücre sayısı ile beraber kayıpların da artmasından dolayı bu artışın doğru orantılı olmayacağı sonucuna ulaşılmıştır [4].

PEM yakıt hücresi ile ilgili yapılan başka bir çalışmada, akış kanalı tasarımının PEM yakıt hücresi performansına etkileri incelenmiştir. Bu çalışmada PEM yakıt pili için dairesel 3'lü ve 4'lü serpantin, karesel dörtlü serpantin, geniş kavisli karesel dörtlü serpantin ve karesel paralel akış olmak üzere beş farklı akış kanalı tasarımına sahip plakalar imal edilerek değişen basınç değerlerinde performans testleri yapılmıştır. Bu çalışma ile çoklu serpantin akış plakası tasarımının olumlu verdiği gözlemlenmiştir [1].

Yakıt pili ile ilgili Bilgili ve Sivrioğlu, PEM yakıt pilinin değişik membran elektrot çifti kalınlıklarında ve farklı çalışma basıncı koşullarında üç boyutlu sayısal analizini inceleyen bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmada iki farklı kalınlıkta hazırlanan MEÇ (Membran Elektrot Çifti) ile 150kPa, 200kPa, 300kPa ve 400kPa çalışma basınçlarında analizler yapılmıştır. Çalışma basınçlarının artmasıyla beraber akım yoğunluklarındaki değerlerin de arttığı gözlemlenmiştir [5].

Kahraman ve arkadaşları, hücre sıkıştırma basıncının PEM yakıt pili performansı üzerine etkisinin incelendiği bir çalışma yapmışlardır. Anot ve katot taraflarında saf hidrojen ve oksijenin kullanıldığı bu çalışmada 5 cm<sup>2</sup> aktif alana sahip tek hücreli bir yakıt pilinden yararlanılmıştır. Çalışma sonucunda, 12 Nm sıkıştırma torkuna kadar performansın arttığı, dirençsel kayıp bölgesindeki gerilim artışının kütle transfer kayıp bölgesindeki artışa kıyasla daha fazla olduğu görülmüştür [8].



PEM yakıt hücresindeki suyun olması gerekenden düşük veya yüksek olması hücre performansını olumsuz etkilemektedir. PEM yakıt pilindeki su yönetimin önemi üzerine yapılmış bir çalışmada yakıt hücrelerinde hava stokiyometrik oran ve bağıl neminin hücre performansına etkisi incelenmiştir. Bu araştırma neticesinde PEM yakıt hücresinde su yönetiminin verimli hale getirilebilmesi için membranın yeteri kadar nemlendirilmesi ve suyun kanallardan hızlıca uzaklaştırılması sağlanarak su birikme ve taşmalarının engellenmesi gerektiği sonucuna ulaşılmıştır [14].

Havadan yani saf olmayan oksijen ile yakıt pili beslendiğinde genel olarak katot stokiyometrik oranı 2 olarak gerçekleşir. Polak ve arkadaşları katot tarafının saf oksijen ile beslendiğinde katot stokiyometrik oranının saf oksijen kullanılmadığı haline göre nasıl değişeceği üzerine deneysel bir çalışma yürütmüşlerdir. Çalışma sonucunda katot tarafında saf oksijen kullanılmasıyla, yığın verimliliği aynı kalmak koşuluyla, katot stokiyometrik oranı 1,25 değerine düşmüştür [11].

PEM yakıt hücresi ile ilgili yapılan başka bir çalışmada farklı kanal genişliğinin PEM yakıt hücresi performansına etkisi incelenmiştir. Hücre genişliği ve kanal yüksekliğinin sabit tutulduğu bu çalışmada sadece kanal genişliği değiştirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda kanal genişliği arttıkça akım yoğunluğunun azaldığı sonucuna varılmıştır [6].

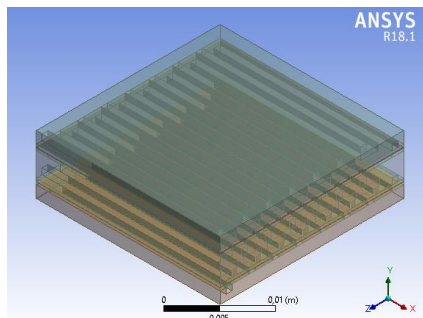
Yakıt hücrelerinin çalışmasına etki eden faktörler ile ilgili bir literatür taraması yapıldığında yakıt hücresi yığın performansına stokiyometrik oranın etkisinin incelendiği farklı çalışmalara ulaşılmıştır [10,17-21]. Bu çalışmalarda sadece katot stokiyometrisinin etkisini dikkate alan [17], geri basınçlandırma ve anot stokiyometrisini inceleyen [18], hava stokiyometrisini yani katot stokiyometrisi dikkate alan [19], yük değişimi esnasındaki stokiyometri değişimini inceleyen [20], PEM yakıt hücresi çalışma koşullarının (akım yoğunluğu, çalışma sıcaklığı, katot stokiyometrisi, vb.) ısı ve su oluşumu üzerine etkilerini inceleyen çalışmalara ulaşılmıştır. Bu çalışmada ise iki hücreli PEM yakıt hücresi yığını performansına stokiyometri oranının etkisi literatürdeki çalışmalardan farklı olarak hem anot hemde katot stokiyometrisinin eş zamanlı olarak değiştirilmesi ile sayısal olarak incelenmiştir. Çalışma sonucu elde edilen polarizasyon eğrileri, güç-akım yoğunluğu eğrileri, sıcaklık dağılımları ve kütle kesri dağılımları gösterilmiş ve yorumlar yapılmıştır.

## 2. MATERYAL ve METOT (MATERIAL and METHOD)

Literatürde tek bir PEM yakıt hücresinin (single PEM fuel cell) modellenmesine ait oldukça fazla sayıda çalışma bulunmaktadır. Bunun yanısıra çok hücreli yakıt hücresi yığınlarının modellenmesine ait çalışmalarda son yıllarda artmıştır. Bu çalışmada iki hücreli PEM yakıt hücresi yığın modeli belirli çalışma koşullarında sayısal olarak HAD programı kullanılarak analiz edilmiştir. Öncelikle çalışmanın karşılaştırılabilmesi için Bilgili ve arkadaşlarının yaptığı 3 boyutlu model geometrisi [4] temel alınmıştır.

### 2.1. PEM Yakıt Hücre Yığını Modeli (PEM Fuel Cell Stack Model)

Bu çalışmamızın amacı PEM yakıt hücresi yığını performansına stokiyometrik oranın etkisinin incelenmesi olduğu için tasarım kısmında Bilgili ve arkadaşlarının [4] ilgili makalesindeki iki hücreli PEM yakıt hücresi yığın tasarımına bağlı kalınarak sayısal analizler gerçekleştirilmiştir.



**Şekil 1.** İki hücreli PEM yakıt hücresi yığınının 3 boyutlu görüntüsü [4]

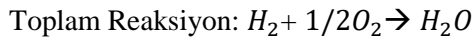
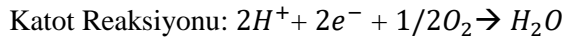
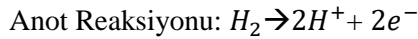
Şekil 1’de genel görüntüsü verilen iki hücreli PEM yakıt hücresi yığının geometrik boyutları ve özellikleri Tablo 1’de verilmiştir.

**Tablo 1.** Yakıt hücresinin geometrik özellikleri [4]

FİZİKSEL BOYUTLAR	1S SERPANTİN	BİRİM
Kanal Derinliği	0,75	mm
Kanal Genişliği	0,75	mm
Akış Kanalı Kesit Alanı	0,5625e-06	mm <sup>2</sup>
Yakıt Pili Aktif Alanı	0,00054	mm <sup>2</sup>
Difüzyon Tabakası Kalınlığı	0,325	mm
Katalizör Tabakası Kalınlığı	0,015	mm
Membran Kalınlığı	0,05	mm

## 2.2. Yakıt Pili Yığın Hesaplamaları (Calculations of Fuel Cell Stack)

PEM yakıt pillerinde anot ve katot kutuplarında birbirlerinden bağımsız olarak reaksiyonlar gerçekleşir. Anot kutbuna gönderilen hidrojen elektronların ayrılması neticesinde protonlar oluşur. Oluşan bu protonlar geçirgen zardan; elektronlar ise ayrı bir devreden katoda ulaşır. Katoda gönderilen havada bulunan oksijen molekülleri ile katot tarafından gelen proton ve elektronların reaksiyonu ile devre tamamlanır. Açığa ise su çıkar. PEM yakıt pilinin anot kutbunda ve katot kutuplarında şu reaksiyonlar gerçekleşir:



PEM yakıt pillerindeki güç hesaplamaları temelde yakıt pilinin voltaj (V) ve akım (I) değerlerine bağlıdır. Her bir hücredeki ortalama potansiyel ile toplam hücre sayısının çarpımı yığının ortalama potansiyelini verir. Elde edilen bu değer ile akımın çarpılması sonucunda ise güç meydana gelir. Basit olarak elde edilen güç denklemi şu şekildedir [2]:

$$W = V_{\text{hücre}} \times n_{\text{hücre}} \times I \quad 1$$

Akım yoğunluğu değeri (i) [A/cm<sup>2</sup>] akımın yakıt pili aktif alanına bölünmesi sonucu elde edilir. Çalışma da analizler 343 K ve ortam basıncı 1 atm değerlerine göre yapılmıştır. Hesaplamalarda hücre sayısı ( $n_{\text{hücre}}$ ) 2 olarak alınmış ve yakıt pili aktif alanı (A) 5,4 cm<sup>2</sup> olarak belirlenmiştir. Anot ve katot giriş debisi hesabı aşağıdaki Eş.(2) ve Eş.(4) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\dot{n}_{H_2} = n_{\text{hücre}} \left( \lambda_a \frac{i \cdot A}{n_e \cdot F} \right) \quad 2$$

Eş.(2)’deki  $\dot{n}_{H_2}$  anot tarafı için mol debisini ifade ederken  $n_{\text{hücre}}$  ise yakıt pili yığınındaki hücre sayısını gösterir.  $\lambda_a$  reaktan gazların stokiyometrik oranıdır ve sağlanan reaktif akışının harcanan reaktif akışına olan oranını ifade eder. Anot ve katot stokiyometrik oranlarının matematiksel gösterimi Eş.(3)’de verilmiştir. Anot ve katot tarafı için bu değer 1,5, 2,0, 2,5, 3,0, 3,5 olarak alınmıştır.

$$\lambda_a = \frac{\dot{n}_{H_2, \text{sağlanan}}}{\dot{n}_{H_2, \text{harcanan}}} ; \lambda_c = \frac{\dot{n}_{O_2, \text{sağlanan}}}{\dot{n}_{O_2, \text{harcanan}}} \quad 3$$

Ayrıca  $n_e$  ilgili türün her bir molü için transfer edilen elektron sayısını ifade eder. Eş.2 için ilgili tür hidrojen olduğu için  $n_e=2$  eq/mol olarak alınmıştır. Faraday sabiti (F) ise 96485 C/mol olarak hesaba katılmıştır.

Eş.(2) ile bulunan mol debisi, molekül ağırlığı ile çarpılarak kütle debisi ( $\dot{m}_{H_2}$ ) hesaplanır.

$$\dot{m}_{H_2} = \dot{n} \times M \quad 4$$

Bu aşamadan sonra anot giriş tarafındaki nem de hesaplanarak toplam kütle debisi bulunur. Kütle kesri ( $m_{fi}$ ) için  $H_2=0,3$  ve  $H_2O=0,7$  olarak alınmıştır.

$$m_{fi} = \frac{\dot{m}_{H_2}}{\dot{m}_{H_2O} + \dot{m}_{H_2}} \quad 5$$

Eş.(5) denkleminde bulunan  $\dot{m}_{H_2O}$  değeri ile Eş.(3)'den bulunan hidrojen kütle debisi toplanarak toplam anot giriş kütle debisi bulunur.

Katot giriş debisi hesaplanırken saf oksijen alınmamıştır. Bu yüzden havada oksijen miktarı %21 olduğundan dolayı bu değer hesaba katılmıştır. Ayrıca katot giriş tarafı için nemlendirme yapılmamıştır.

Yukarıdaki eşitlikler ile anot ve katot stokiometrik oranları için eş zamanlı olarak ("1,5", "2", "2,5", "3", "3,5") değerleri alınarak gerekli hesaplamalar yapılmıştır. Bu hesaplar neticesinde bulunan anot ve katot tarafındaki gaz giriş debileri Tablo 2'de verilmiştir.

**Tablo 2.** Farklı stokiometrik oranlarda giriş kütle debileri

Anot Stokiometrik Oran	1,5	2	2,5	3	3,5
Katot Stokiometrik Oran	1,5	2	2,5	3	3,5
Anode Mass Flow Inlet (kg/s)	5,6413e-07	7,521e-07	9,4e-07	1,13e-06	1,32e-06
Cathode Mass Flow Inlet (kg/s)	6,395e-06	8,527e-06	1,06e-05	1,28e-05	1,49e-05

Sayısal analizde kullanılan elektrokimyasal parametreler ve aldıkları değerler birimleri ile birlikte Tablo 3'de sırayla verilmiştir.

**Tablo 3.** Sayısal analizde kullanılan elektrokimyasal parametreler

PARAMETRELER	DEĞER	BİRİM
Anot Referansı Akım Yoğunluğu	1,0	A.cm <sup>-2</sup>
Anot Referansı Mol Derişimi	1	kmol.m <sup>-3</sup>
Anot Derişiminin Değeri	0,5	-
Anot Aktarım Katsayısı	1	-
Katod Referansı Akım Yoğunluğu	1,0	A.cm <sup>-2</sup>
Katod Referansı Mol Derişimi	1,0	kmol.m <sup>-3</sup>
Katod Derişiminin Değeri	1	-
Katod Aktarım Katsayısı	1	-
Açık Devre Voltajı	0,977	V
GDL Isıl İletkenliği	1,6	W(m.K) <sup>-1</sup>
Katalizör Tabakası Isıl İletkenliği	2	W(m.K) <sup>-1</sup>
Bipolar Plakanın Isıl İletkenliği	20	W(m.K) <sup>-1</sup>
GDL Elektriksel İletkenliği	2500	(ohm.m) <sup>-1</sup>
Katalizör Tabakası Elektriksel İletkenliği	2500	(ohm.m) <sup>-1</sup>
Bipolar Plakanın Isıl İletkenliği	22000	(ohm.m) <sup>-1</sup>
GDL Gözenekliliği	0,75	-
Katalizör Tabakası Gözenekliliği	0,5	-
Temas Açısı Anot/Katod	165	°
Temas Direnci	5e-07	ohm.m <sup>2</sup>
Membran Eşdeğer Ağırlık	1100	kg.kmol <sup>-1</sup>

Analizler beş farklı stokiometrik oran için altı farklı voltaj değeri (0.8V, 1.0V, 1.2V, 1.4V, 1.6V, 1.8V) ile ANSYS Fluent programı kullanılarak yapılmıştır. Sayısal analiz için kullanılan denklemler aşağıda verilmiştir.

Kütlenin korunumu kanunundan gaz difüzyon katmanındaki ve kanallardaki süreklilik denklemi Eş.(6)'de verilmiştir.

$$\nabla(\rho\epsilon\mu) = S_m \quad 6$$

Eş.(6)'de verilen  $S_m$  yakıt pilindeki anot tarafındaki elektrokimyasal reaksiyonlar boyunca meydana gelen üretim ve tüketimi gösterirken  $\epsilon$  elektrottaki gözeneklilik katsayısını,  $\rho$  gaz karışımının yoğunluğunu ve  $\mu$  ise akışkanın hız vektörünü ifade etmektedir.

Eş.(7)'de ise momentumun korunumu denklemi verilmektedir. Bu denklemdeki  $p$  basıncı,  $\mu$  ise viskoziteyi göstermektedir.  $S_u$  ise gözenekli orama bağlı bir kaynak terimini temsil etmektedir.

$$\nabla.(\epsilon\rho\mu u) = -\epsilon\nabla p + (\epsilon\mu_{eff}\nabla u) + S_u \quad 7$$

Enerji denklemi Eş.(8)'deki ifade ile gösterilmiştir. Burada ki  $\lambda_{eff}$  efektif iletkenliğini,  $C_p$  izobarik ısıyı,  $S_h$  ise enerji kaynağı terimini ifade eder.

$$\nabla.(\lambda_{eff}\nabla T) = \nabla.(\epsilon\rho C_p u T) + S_h \quad 8$$

Türlerin korunumu ise

$$\frac{\partial(\epsilon C_k)}{\partial t} + \nabla(\epsilon \vec{v} C_i) = \nabla(D_i \nabla C_i) + S_i \quad 9$$

şeklinde ifade edilir. Buradaki  $C_i$  i türünün yoğunluğunu,  $D_i$  i türünün difüzyon katsayısını gösterirken  $S_i$  ise türlere ait kaynak terimini ifade eder.

Elektronlar için yükün korunumu eşitliği,

$$\nabla.(\sigma_s^{eff}\nabla\phi_s) = S_e \quad 10$$

şeklinde ifade edilirken protonlar için yükün korunumu eşitliği ise

$$\nabla.(\sigma_m^{eff}\nabla\phi_m) = S_i \quad 11$$

ile ifade edilir. Buradaki  $\phi_s$  katı faz potansiyelini,  $\phi_m$  membran potansiyelini,  $\sigma_s^{eff}$  efektif elektrik iletkenliğini,  $\sigma_m^{eff}$  ise membranın iyonik iletkenliğini gösterir. Bu denklemler tasarımı yapılan iki hücreli PEM yakıt hücresi yığını için stokiyometrik oranın performansına etkisinin incelenmesi için kullanılmıştır. Her bir katman için çözülen denklemler ve kaynak terimlerinin eşitliklerine detaylı olarak [3]'den ulaşılabilir.

### 3. BULGULAR ve TARTIŞMA (OBSERVATIONS and DISCUSSIONS)

Beş farklı stokiyometrik oran değeri için altı ayrı voltaj değerlerinde ANSYS Fluent programı kullanılarak sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Stokiyometrik oran, anot ve katot tarafında aynı olacak şekilde alınmıştır. Örneğin ilk yapılan analizde anot ve katot tarafı stokiyometrik oranı 1,5 alınarak belirli bir voltajdaki akım yoğunluğu değeri bulunmuştur. Değişen stokiyometrik oranlarda ve voltaj değerlerinde elde edilen akım yoğunluğu değerleri Tablo 4'de detaylı olarak gösterilmektedir.

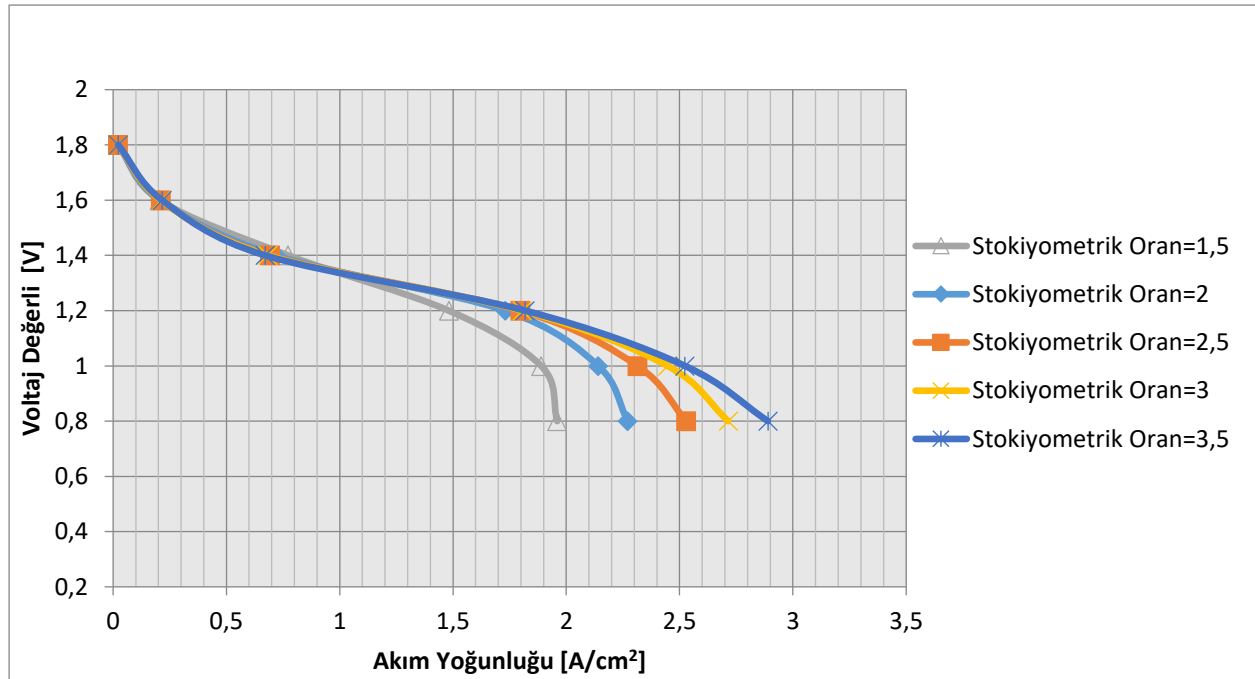
**Tablo 4.** Farklı stokiyometrik oranlarda ve voltajlarda elde edilen akım yoğunluğu değerleri

Stokiyometrik Oran=1,5		Stokiyometrik Oran=2		Stokiyometrik Oran=2,5	
Volt	Akım Yoğunluğu (A/cm <sup>2</sup> )	Volt	Akım Yoğunluğu (A/cm <sup>2</sup> )	Volt	Akım Yoğunluğu (A/cm <sup>2</sup> )
1,8	0,022	1,8	0,022	1,8	0,022
1,6	0,205	1,6	0,206	1,6	0,210
1,4	0,772	1,4	0,718	1,4	0,692
1,2	1,482	1,2	1,731	1,2	1,798
1	1,890	1	2,141	1	2,314
0,8	1,960	0,8	2,271	0,8	2,530

**Tablo 4 . Farklı stokiyometrik oranlarda ve voltajlarda elde edilen akım yoğunluğu değerleri (Devam)**

Stokiyometrik Oran=3		Stokiyometrik Oran=3,5	
Volt	Akım Yoğunluğu (A/cm <sup>2</sup> )	Volt	Akım Yoğunluğu (A/cm <sup>2</sup> )
1,8	0,022	1,8	0,023
1,6	0,212	1,6	0,216
1,4	0,683	1,4	0,671
1,2	1,806	1,2	1,819
1	2,447	1	2,524
0,8	2,715	0,8	2,890

Bu sonuçlar neticesinde her bir stokiyometrik oranda elde edilen akım yoğunluğu değerleri kullanılarak Şekil 2’de görülen polarizasyon eğrileri elde edilmiştir.

**Şekil 2 . Farklı stokiyometrik oranlarda iki hücreli yakıt pili yığı için polarizasyon eğrileri**

Yapılan analizler neticesinde elde edilen polarizasyon eğrilerine göre farklı stokiyometrik oranlarda elde edilen akım yoğunluğu değerlerinin 1,8 V ile 1,4 V arasında birbirlerine benzer şekilde olduğu, 1 V ile 0,8 V arasında ise belirgin şekilde farklılık gösterdiği gözlemlenmiştir. Bununla birlikte voltaj değerleri düşüktükçe her bir stokiyometrik orandaki akım yoğunluğu değerlerinde artış meydana geldiği görülmüş, en fazla akım yoğunluğu değerlerine ise 0,8 V’da ulaşılmıştır. 0,8 V değeri için yapılan analizlerde elde edilen akım yoğunluğu değerleri, stokiyometrik oran 1,5 için 1,96 A/cm<sup>2</sup>, stokiyometrik oran 2 için 2,27 A/cm<sup>2</sup> ve stokiyometrik oran 2,5 için 2,53 A/cm<sup>2</sup> şeklinde elde edilmiştir. Aynı voltaj değerinde akım yoğunluğu stokiyometrik oran 3 için 2,72 A/cm<sup>2</sup>, stokiyometrik oran 3,5 için 2,89 A/cm<sup>2</sup> olarak hesaplanmıştır. Stokiyometrik oranlar arası akım yoğunluğu değerlerinin en fazla farklılık gösterdiği 0,8 V değerindeki akım yoğunluğu artışı stokiyometrik oran 1,5 - 2 arasında %15,85, stokiyometrik oran 2 - 2,5 arasında %11,38 şeklinde gerçekleşmiştir. Aynı voltaj değerinde stokiyometrik oran 2,5 - 3 arasında %7,32 oranında artış görülürken stokiyometrik oran 3-3,5 arasında % 6,45 şeklinde artış gerçekleşmiştir.

Şekil 2’de net bir biçimde görüldüğü gibi akım yoğunluğu değerleri 1,2V değeri ve daha düşük voltaj değerleri için stokiyometrik oran arttıkça artmakta, fakat artış miktarı stokiyometri artışına bağlı olarak yavaşlamaktadır. Buradan polarizasyon eğrisinde yüksek akım yoğunluğu bölgesinde, artan stokiyometrik oran değerleri için akım yoğunluğundaki artışın azaldığı söylenebilir.

**Tablo 5.** Farklı stokiyometrik oranlarda değişen voltaj değerlerine göre elde edilen güç değerleri

Stokiyometrik Oran=1,5	Güç	Stokiyometrik Oran=2	Güç	Stokiyometrik Oran=2,5	Güç
<b>0,8V</b>	8,47	<b>0,8V</b>	9,81	<b>0,8V</b>	10,93
<b>1V</b>	10,20	<b>1V</b>	11,56	<b>1V</b>	12,50
<b>1,2V</b>	9,60	<b>1,2V</b>	11,22	<b>1,2V</b>	11,65
<b>1,4V</b>	5,84	<b>1,4V</b>	5,43	<b>1,4V</b>	5,24
<b>1,6V</b>	1,77	<b>1,6V</b>	1,78	<b>1,6V</b>	1,82
<b>1,8V</b>	0,21	<b>1,8V</b>	0,21	<b>1,8V</b>	0,21

**Tablo 5.** Farklı stokiyometrik oranlarda değişen voltaj değerlerine göre elde edilen güç değerleri (Devam)

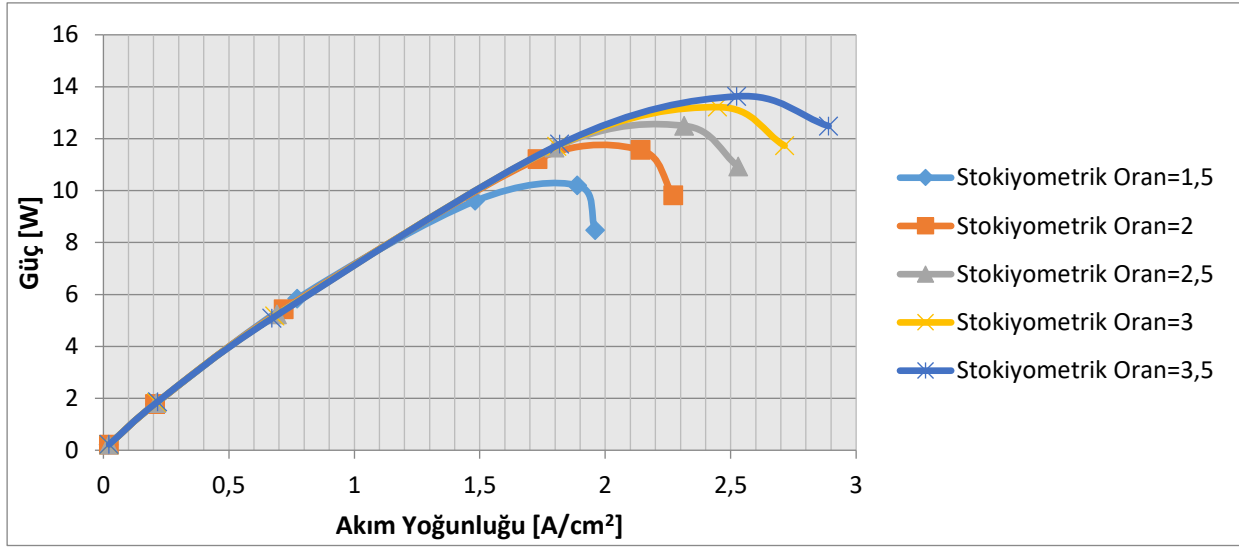
Stokiyometrik Oran=3	Güç	Stokiyometrik Oran=3,5	Güç
<b>0,8 V</b>	11,73	<b>0,8V</b>	12,49
<b>1V</b>	13,21	<b>1V</b>	13,63
<b>1,2V</b>	11,70	<b>1,2V</b>	11,79
<b>1,4V</b>	5,17	<b>1,4V</b>	5,08
<b>1,6V</b>	1,83	<b>1,6V</b>	1,87
<b>1,8V</b>	0,22	<b>1,8V</b>	0,22

Her bir stokiyometrik oran için 0,8 V'dan 1,8 V'a kadar farklı potansiyel değerlerinde analizler yapılarak elde edilen akım yoğunluğu değerleri ile Eş.(1) kullanılarak güç değerleri sayısal olarak hesaplanmıştır. Stokiyometrik oranların her biri ayrı ayrı incelendiğinde en yüksek güç noktalarının analiz yapılan değerler arasından 1 V değerinde olduğu görülmüştür (Tablo 5).

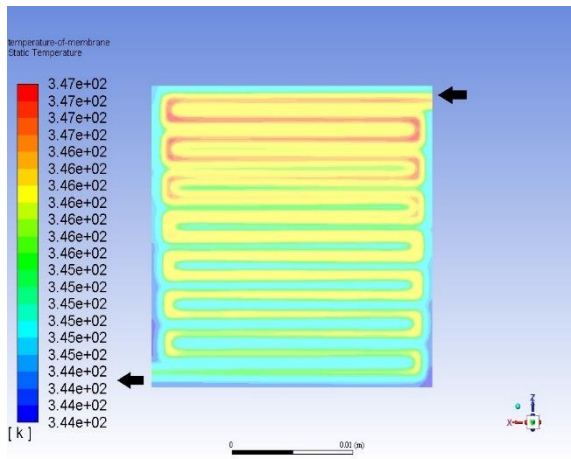
Tablo 5'deki veriler doğrultusunda her bir stokiyometrik oran için güç-akım yoğunluğu eğrileri Şekil 3'de gösterildiği gibi elde edilmiştir.

Her bir stokiyometri değeri için elde edilen eğrilerde Şekil 3'de görüldüğü üzere güç eğrileri bir maksimum tepe değerine ulaşmakta ve sonrasında düşüşe geçmektedir. Stokiyometrik oran 1,5 için yapılan analizde tepe noktası 1,89 A/cm<sup>2</sup> değerinde görülmüştür. Tepe noktası değeri stokiyometrik oran 2 için 2,14 A/cm<sup>2</sup>, stokiyometrik oran 2,5 için 2,31 A/cm<sup>2</sup>, stokiyometrik oran 3 için 2,44 A/cm<sup>2</sup> ve stokiyometrik oran 3,5 için ise 2,52 A/cm<sup>2</sup> şeklinde gözlemlenmiştir. Her bir stokiyometrik oranda elde edilen güç miktarları karşılaştırıldığında ulaşılan tepe noktaları arasındaki artış oranı stokiyometrik oran 1,5-2 arasında %13,34, stokiyometrik oran 2-2,5 arasında %8,09, stokiyometrik oran 2,5-3 arasında %5,75 ve stokiyometrik oran 3-3,5 arasında ise %3,14 olarak gerçekleşmiştir. Burada elde edilen sonuçlardan görüldüğü gibi stokiyometrik oranın artmasıyla beraber güç değerlerinin de arttığı, fakat bu artışın doğru orantılı olarak gerçekleşmediği, güç değerlerinin artış oranında azalma meydana geldiği görülmüştür.

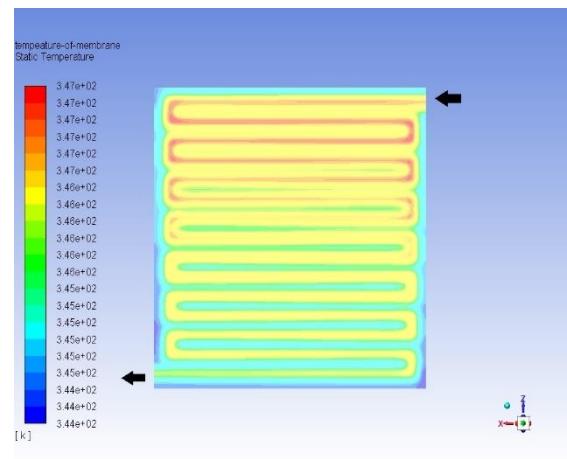
Yapılan analizler sonucunda membran sıcaklık dağılımı, anot ve katot kütle kesir oranlarının dağılımları da elde edilmiştir. Her bir stokiyometrik oran için elde edilen güç miktarına en fazla 1 V potansiyel farkı değerinde ulaşıldığı için aşağıda bu volt değerindeki sıcaklık, anot kesri ve katot kesri dağılımlarına yer verilmiştir (Şekil 4, Şekil 5 ve Şekil 6).



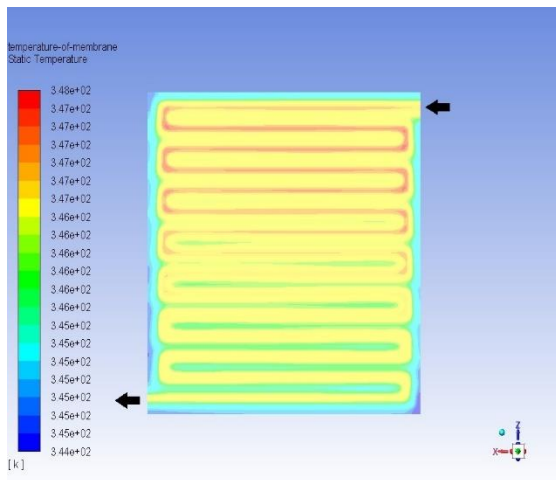
Şekil 3. Farklı stokiyometrik oranlarda elde edilen güç- akım yoğunluğu eğrileri



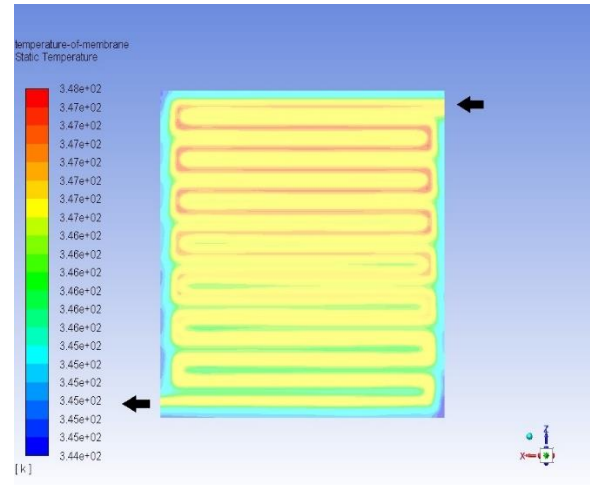
(a)



(b)



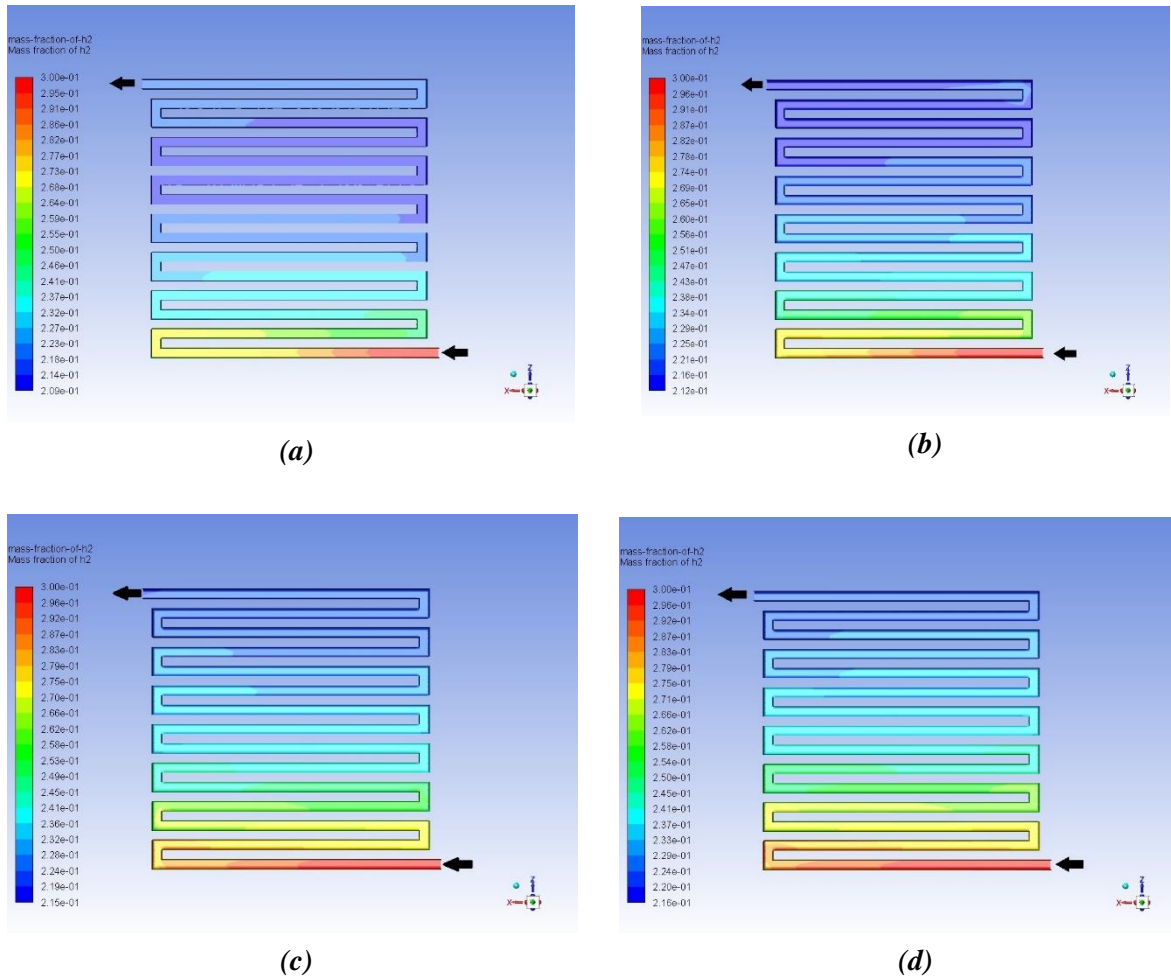
(c)



(d)

Şekil 4. Membran tabakası sıcaklık dağılımları (a) Stokiyometrik oran 1,5 (b) Stokiyometrik oran 2 (c) Stokiyometrik oran 3 (d) Stokiyometrik oran 3,5

Yakıt hücreleri için değişen koşullardaki sıcaklık analizleri yakıt hücrelerinin çalışma performansı açısından önemlidir. Yan ve arkadaşları'nın PEM Yakıt hücresinin çeşitli çalışma koşulları altındaki durumunu inceledikleri çalışmaya göre yakıt pilinin çalışma sıcaklığının gaz difüzyon ve katalizör tabakalarındaki su transferi ve membran iletkenliği üzerindeki etkisi nedeniyle yakıt hücresi performansını önemli ölçüde etkilediği bulunmuştur [15]. Her bir stokiyometrik oran için Şekil 4. (a), (b), (c), (d) ayrı ayrı incelendiğinde her birindeki maksimum minimum sıcaklık farkının en fazla 5°C olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca sözü edilen şekiller bir bütün olarak incelendiğinde stokiyometrik oran arttıkça sıcaklık değerlerinin de arttığı fakat bu artışın yalnızca 1-2°C ile sınırlı kaldığı görülmektedir. Buradan yola çıkarak stokiyometrik oranın PEM yakıt hücresi çalışma sıcaklığına fazla bir etkisinin olmadığı sonucuna varılabilir. Bununla birlikte aynı voltaj değerlerinde stokiyometrik oran arttıkça sıcaklık dağılımları daha homojen hale gelmektedir. Bunun sebebi ise konvektif ısı transferinin artmasından dolayı gerçekleştiği düşünülmektedir.

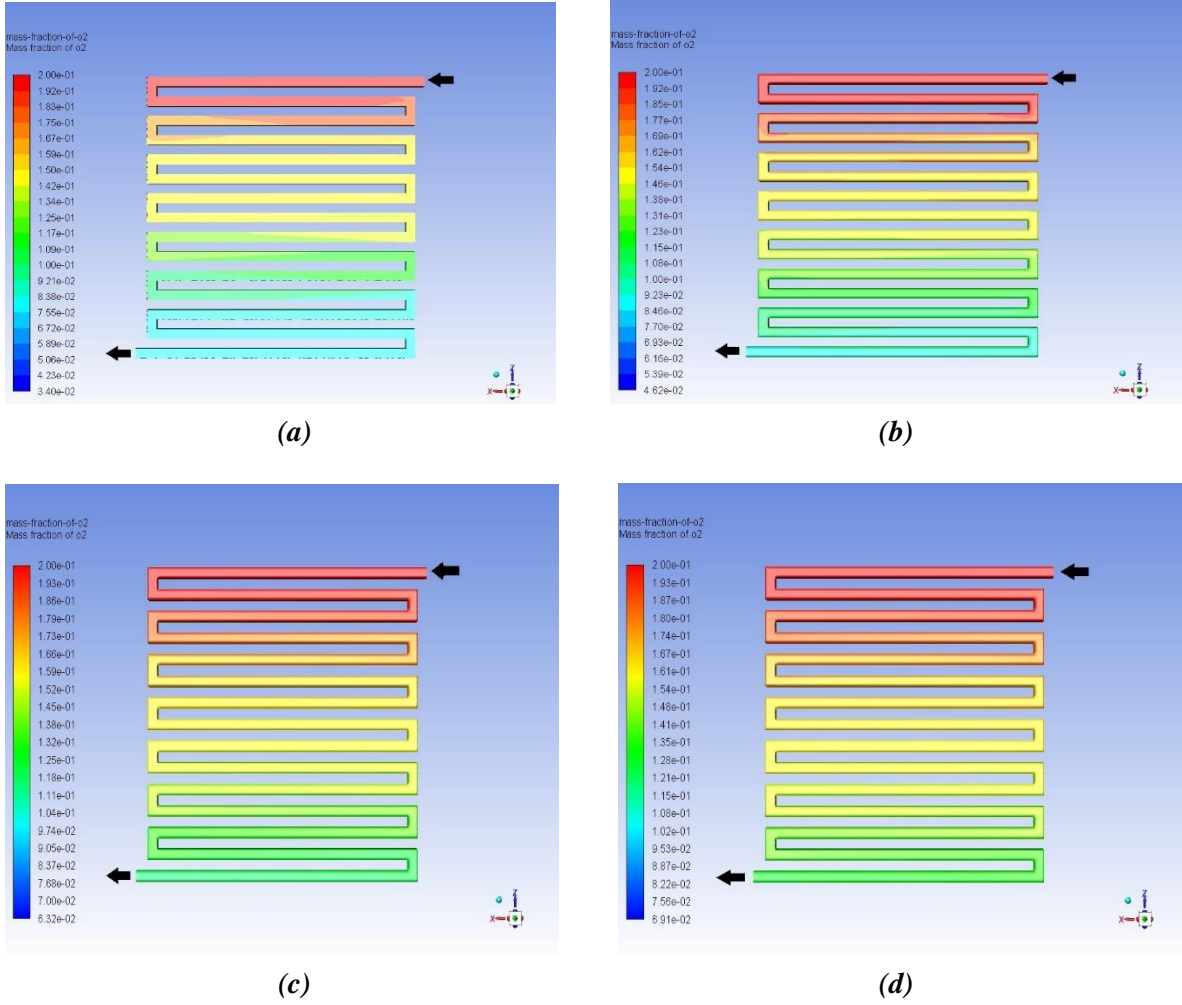


**Şekil 5.** Gaz akış kanalı içersisinde anot kütle kesri dağılımları (a) Stokiyometrik oran 1,5 (b) Stokiyometrik oran 2 (c) Stokiyometrik oran 3 (d) Stokiyometrik oran 3,5

Analizler neticesinde elde edilen anot kütle kesri dağılımları Şekil 5’de gösterilmiştir. Bu dağılımlara bakıldığında her bir yakıt hücresinin giriş kütle kesri oranı 0,3 olarak gerçekleşmiştir. Stokiyometrik oran 1,5 için çıkış anot kütle kesri 0,209 olarak gerçekleşirken, bu oran stokiyometrik oran 2 için 0,211, stokiyometrik oran 3 için 0,215, stokiyometrik oran 3,5 için ise 0,216 şeklinde gerçekleşmiştir. Bu veriler doğrultusunda çıkış kütle kesrinin stokiyometrik oran arttıkça artış gösterdiği gözlemlenmiştir. Ayrıca dağılımlar incelendiğinde stokiyometrik oranın artmasıyla beraber kanal boyuncaki kütle kesri oranlarının daha da homojen hale geldiği sonucu elde edilmiştir. Kütle kesri oranının kanallar boyunca artış göstermesi



daha fazla reaksiyonun gerçekleşmesine ve bununla birlikte yakıt hücresi performansının daha da artmasına neden olmaktadır.



**Şekil 6.** Gaz akış kanalı içerisinde katot kütle kesri dağılımları (a) Stokiyometrik oran 1,5 (b) Stokiyometrik oran 2 (c) Stokiyometrik oran 3 (d) Stokiyometrik oran 3,5

1V değeri için elde edilen katot kütle kesri dağılımları Şekil 6'da gösterilmiştir. Artan stokiyometrik oranlar ile beraber 1V değeri için yapılan analizlerde, katot kütle kesri dağılımı incelendiğinde her bir yakıt hücresindeki giriş kütle kesri 0,2 olarak gerçekleşmiştir. Çıkış katot kütle kesri değerleri stokiyometrik oran 1,5 için 0,034, stokiyometrik oran 2 için 0,046, stokiyometrik oran 3 için 0,063 ve stokiyometrik oran 3,5 için ise 0,069 olarak elde edilmiştir. Anot kütle kesrine benzer olarak katot kütle kesri oranı da stokiyometrik oran arttıkça artış göstermiş ve kanallardaki katot kesri dağılımı daha homojen bir hale geldiği görülmektedir.

#### 4. SONUÇLAR (RESULTS)

Bu çalışmada belirlenen anot ve katot stokiyometrik oranlarında PEM yakıt hücresi yığını performansına etkisi sayısal olarak incelenmiştir. Analizler neticesinde yüksek akım yoğunluğu bölgesinde, artan stokiyometrik oran değerleri için akım yoğunluğunda da artış olmuştur. Bu artışın oranı, stokiyometrik oranlar arttıkça azalmıştır. Stokiyometrik oranların her biri ayrı ayrı incelendiğinde en yüksek güç noktalarının analiz yapılan potansiyel farkı değerleri arasından 1 V değerinde olduğu görülmüştür.

Değişen voltaj değerlerinde stokiyometrik oranın artmasıyla beraber sıcaklık artışının gerçekleştiği fakat bu artışın 1-2°C olduğu görülmüştür. Bununla birlikte stokiyometrik oranın artmasıyla sıcaklık dağılımının daha homojen bir hale geldiği sonucuna ulaşılmıştır. Anot ve katot kütle kesirlerinin ise artan stokiyometrik oran ile birlikte arttığı ve dağılımlarının yakıt hücresi geneline daha homojen olarak yayıldığı sonucu elde edilmiştir.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Çelik, S. (2018). Akış Kanalı Tasarımının PEM Yakıt Pili Performansına Etkilerinin İncelenmesi. Niğde Ömer Halis Demir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 7(1), 407-416.
- [2] Barbir, F. (2005). Introduction. PEM Fuel Cells Theory and Practice, Elsevier Academic Press, London, 17-30.
- [3] Bilgili M., Bosomoui M., Tsotridis G. (2015). Gas flow field with obstacle for PEM fuel cells at different operating conditions. International Journal of Hydrogen Energy, 40(5), 2303-2311.
- [4] Arıç T., Bilgili, M., Ozsunar A.K. (2019). İki Hücreli PEM Yakıt Pili Yığının Sayısal Analizi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji, 7 (4), 999-1011.
- [5] Bilgili M. ve Sivrioğlu M. (2016). PEM Yakıt Pili Değişik Membran Elektrot Çifti Kalınlıklarında ve Farklı Çalışma Basıncı Koşullarında Üç Boyutlu Sayısal Analizi, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 31 (1).
- [6] Eker Kahveci, E. ve Taymaz, İ. (2013). Akış Kanalı Genişliğinin PEM Tipi Yakıt Hücresi Performansına Etkisinin İncelenmesi. Sakarya University Journal of Science, 17 (2), 195-200.
- [7] J. Zhang, J. Wu, H. Zhang. (2013). PEM Fuel Cell Testing and Diagnosis, Elsevier.
- [8] Kahraman, H., Çevik, I., Coşman, S. (2014). Sıkıştırma Basıncının PEM Yakıt Pili Performansına Etkisi. 2. Uluslararası Mühendislik ve Bilim Alanında Yenilikçi Teknolojiler Sempozyumu, Karabük, 1008-1015.
- [9] Mahreni, Mohamad, A. B., Khadum, A. A. H., Daud, W. R. W. (2011). Nanocomposite electrolyte for PEMFC Application. Advances in Nanocomposites: Synthesis, Characterization and Industrial Applications, 263.
- [10] Santarelli, M. G., Torchio, M. F., Calı, M., Giarretto, V. (2007). Experimental analysis of cathode flow stoichiometry on the electrical performance of a PEMFC stack. International journal of hydrogen energy, 32(6), 710-716.
- [11] Polak, A., Grzeczka, G., Pilat, T., (2017). Influence of cathode stoichiometry on operating of PEM fuel cell' stack supplied with pure oxygen. Journal of marine engineering&technology, 16(4), 283-290
- [12] Sedighzadeh, M., Rezazadeh, A., Khoddam, M., Zarean, N. (2011). Parameter optimization for a PEMFC model with particle swarm optimization. International Journal of Engineering and Applied Sciences, 3(1), 102-108.
- [13] Şenol, R., Üçgül, İ., Acar, M. (2006). Yakıt Pili Teknolojisindeki Gelişmeler Ve Taşıtlara Uygulanabilirliğinin İncelenmesi. Mühendis ve Makina, 47(563), 37-50.
- [14] Taner, T., Eroğlu, L. (2008). Geleceğin Enerjisi Proton Değişimli Membran Yakıt Pili Su Yönetiminin Önemi, VII. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu, UTES'2008, İstanbul, 735-741.
- [15] Yan, Q., Toghiani, H., Causey, H. (2006). Steady state and dynamic performance of proton exchange membrane fuel cells (PEMFCs) under various operating conditions and load changes. Journal of Power Sources, 161(1), 492-502.

- [16] Yılmaz, A., Ünvar, S., Ekmen, M., Aydın, S.(2017). Yakıt Pili Teknolojisi. *Technological Applied Sciences*, 12 (4), 185-192.
- [17] Adam Polak, Grzegorz Grzeczka & Tomasz Piłat (2017) Influence of cathode stoichiometry on operation of PEM fuel cells' stack supplied with pure oxygen, *Journal of Marine Engineering & Technology*, 16:4, 283-290, DOI: 10.1080/20464177.2017.1381061
- [18] Tatyana V. Reshetenkoa, Guido Bender, Keith Bethune, Richard Rocheleau (2011), Systematic study of back pressure and anode stoichiometry effects on spatial PEMFC performance distribution, *Electrochimica Acta*, 56, 8700– 8710
- [19] Bosung Kim, Dowon Cha, Yongchan Kim (2015) The effects of air stoichiometry and air excess ratio on the transient response of a PEMFC under load change conditions, *Applied Energy*, 138, 143–149
- [20] Sunhoe Kim, S. Shimpalee, J.W. Van Zee (2004) The effect of stoichiometry on dynamic behavior of a proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) during load change, *Journal of Power Sources*, 135, 110–121
- [21] Zirong Yang, Qing Du, Zhiwei Jia, Chunguang Yang, Kui Jiao, (2019) Effects of operating conditions on water and heat management by a transient multi-dimensional PEMFC system model, *Energy*, 183, 462-476

# Faster Region-Based Multi-Layer Convolutional Neural Networks for Cracked Detection in Eggshell Images

 Muammer TÜRKÖĞLU<sup>1,\*</sup> 
<sup>1</sup>Bingöl Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, 12000, Merkez, BİNGÖL

## Graphical/Tabular Abstract

In this study, a deep network-based system was developed for automatic cracked detection in eggshell images. This system consists of image acquisition, image labeling, training, and testing stages. A unique data set based on the developed defective egg detection device was used in experimental studies. The operation steps of the proposed system are given in Figure A.

### Article Info:

Research article  
 Received:10/02/2021  
 Revision:22/02/2021  
 Accepted:26/02/2021

### Highlights

- Eggshell Defects
- Deep Learning
- Segmentation
- MATLAB

### Keywords

Cracked Detection  
 Faster Region-  
 Convolutional Neural  
 Networks  
 Computer Aided Detection  
 System

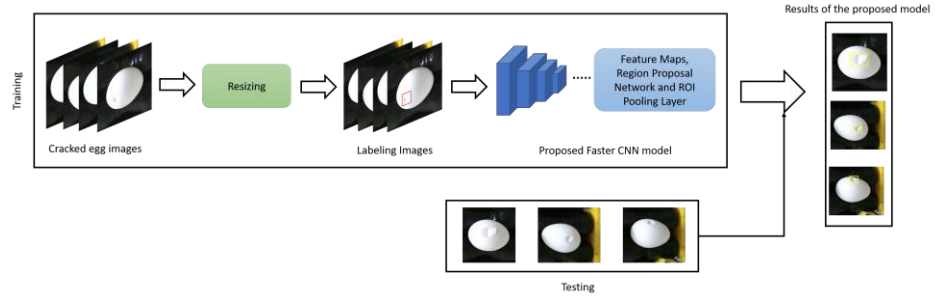


Figure A. Schema of the Proposed System

**Purpose:** Identifying cracked eggs is very significant in terms of health and hygiene. Separating cracked eggs in the food industry is done manually by experts. This situation causes many errors due to eye fatigue and the excessive workload of the expert. In line with this purpose, a deep learning-based system was developed to assist the experts for cracked detection on the egg surface smoothly and in a shorter time.

**Theory and Methods:** In this study, a Faster Region-based Convolutional Neural Network-based model was presented to detect cracked eggs. First, the cracked egg images were resized. Subsequently, the cracked regions were manually labeled on the images, and their locations were determined. The tagged images were applied to the entry of the 16-layer architecture developed based on Convolutional Neural Networks, and the training process was carried out. Finally, the test phase was conducted using the cracked detector containing knowledge about the texture and shape of the cracked areas obtained through the training phase.

**Results:** 107-cracked egg images based on the developed defective-egg detection device were used to test the proposed model. As a result, the proposed model achieved an average precision of 95.69% in detecting cracks on the egg. Visual and numerical test results of the proposed model are given in Chapter 4.

**Conclusion:** In the experimental results, it has been observed that the cracked areas on the egg surfaces are determined correctly with high performance using the proposed model. These results show that the proposed model can be used in the food industry to separate cracked eggs automatically. Besides, this study, in which extensive experimental studies were carried out, is suggested to lead to more studies on cracked detection on the egg surfaces.



## Faster Region-Based Multi-Layer Convolutional Neural Networks for Cracked Detection in Eggshell Images

Muammer TÜRKOĞLU<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>Bingöl Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, 12000, Merkez, BİNGÖL

### Abstract

Automatic detection of cracked eggs is of great importance in terms of health. Today, the separation of cracked eggs is done by experts through observation. This process causes time loss and erroneous detections together with tiring. In this direction, a system based on Region-based Convolutional Neural Network (CNN) has been designed for the automatic detection of cracks in the egg surface. An original data set containing cracked eggs images were created for the training and testing phase of the proposed 16-layer CNN-based model. Cracked regions in 107 egg images using the MATLAB platform were labeled. Within the scope of experimental studies, an average precision of 95.69% was obtained by using the proposed model for cracked region detection. These results showed that the proposed computer-based system can be used to automatically separate cracked eggs in the food industry.

### Makale Bilgisi

Araştırma makalesi  
Başvuru: 10/02/2021  
Düzeltilme: 22/02/2021  
Kabul: 26/02/2021

### Keywords

Egg Cracked Detection  
Faster Region-  
Convolutional Neural  
Networks  
Computer Aided Detection  
System

### Anahtar Kelimeler

Yumurta Kırık Tespiti  
Daha Hızlı Bölgesel  
Evrişimsel Sinir Ağları  
Bilgisayar Destekli Tespit  
Sistemi

### Yumurta Kabuğu Görüntülerinde Kırık Tespiti için Daha Hızlı Bölgesel Tabanlı Çok Katmanlı Evrişimsel Sinir Ağları

### Öz

Kırık yumurtaların otomatik olarak tespiti sağlık açısından büyük bir önem taşımaktadır. Günümüzde, kırık yumurtaların ayrıştırılması uzmanlar tarafından gözlem yoluyla yapılmaktadır. Bu süreç, yorucu olmakla birlikte zaman kaybına ve hatalı tespitlere yol açmaktadır. Bu doğrultuda, yumurta yüzeyindeki kırıkların otomatik tespiti için Bölgesel tabanlı Evrişimsel Sinir Ağına (ESA) dayalı bir sistem tasarlanmıştır. Önerilen 16 katmanlı ESA tabanlı modelin eğitim ve test aşaması için kırık yumurta görüntülerini içeren özgün bir veri seti oluşturulmuştur. MATLAB platformu kullanılarak 107 yumurta görüntüsündeki kırık bölgeler etiketlenmiştir. Deneysel çalışmalar kapsamında, kırık bölge tespiti için önerilen model kullanılarak %95,69 ortalama kesinlik elde edilmiştir. Bu sonuçlar, önerilen bilgisayar destekli sistem, gıda sanayisinde otomatik olarak kırık yumurtaların ayrıştırılması amacıyla kullanılabilceğini göstermiştir.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Hayvansal gıda ürünlerinden biri olan yumurta, insanlar için önemli bir besin kaynağıdır. Yumurta, uygun fiyatlı ve besleyici olması açısından dünya çapında yaygın olarak tüketilmektedir. Bu derece yaygın olarak kullanılan yumurtanın kalite kontrolü de önem arz etmektedir. Yumurtaların toplanması ve paketlenmesi otomatik olarak yapılmasına rağmen yumurta kabuğunda oluşabilecek kusurların tespitine yönelik sistemler yetersiz kalmaktadır. Bu tür problemlerin giderilmesi amacıyla, birçok bilim adamı ve araştırmacı tarafından otomatik bir sistem tasarlanmaya çalışılmıştır [1-4].

Kırık yumurtaların tespit edilmesi, sağlık ve hijyen açısından çok önemlidir. Çatlak ya da kırık yumurtalar, zararlı bakteriyel enfeksiyonların yumurta kabuğundan içeri girmesine yol açmaktadır [1-2, 4]. Bu nedenle, yumurtalar tüketicilere ulaşmadan önce kırık tespitinin yapılması önemli hale gelmektedir. Günümüzde, yumurta kusurlarının tespiti ve ayrıştırılması, uzman kişiler tarafından görsel

olarak yapılmaktadır. Bu durum, uzman kişinin göz yorgunluğu ve aşırı iş yükünden dolayı yumurta kusurlarını tam olarak tespitini sınırlamaktadır. Son zamanlarda, kırık yumurtaların tespiti için makine öğrenmesi ve görüntü işleme yöntemlerine dayalı birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalar, sınıflandırma ve kırık bölge tespiti (segmentasyon) olmak üzere ikiye ayrılır. Bu çalışmalar Tablo 1’de özetlenmiştir.

**Tablo 1.** Mevcut çalışmalar

	Araştırmacılar	Kullanılan Yöntem	Performans (%)
<b>Sınıflandırma</b>	Öztürk ve Gangal [4]	Görüntü işleme teknikleri	88 (doğruluk)
	Omid ve ark. [5]	Görüntü işleme teknikleri ve bulanık mantığa dayalı hibrit bir sistem	94,5 (doğruluk)
	Guanjun ve ark. [6]	LOG (Laplacian of Gaussian) ve görüntü işleme teknikleri	92,5 (doğruluk)
	Wu ve ark. [7]	İstatistiksel özellikler ve DVM sınıflandırıcısı	93 (doğruluk)
	Abbaspour-Gilandeh ve Azizi [8]	Canny kenar detektörü, Hough dönüşümü ve Doğrusal diskriminant analizi	90,1 (doğruluk)
<b>Kırık bölge tespiti (segmentasyon)</b>	Yang ve ark. [9]	Görüntü işleme teknikleri ve bulanık mantığa dayalı bir sistem	94,55 (kesinlik)
	Abdullah ve ark. [10]	Görüntü işleme teknikleri ve Destek Vektör Makinesi	89,2 (duyarlılık) ve 94,6 (özgüllük)
	Datta ve ark. [11]	Daha hızlı bölgesel evrimsel sinir ağları	78,17 (ortalama kesinlik)

Tablo 1’den anlaşılacağı üzere, kırık yumurtaların sınıflandırılmasına dayalı mevcut çalışmalar, yaklaşık olarak %90-95 aralığında performans elde edilirken, segmentasyona dayalı çalışmalarda ortalama %90 performans elde edilmiştir. Ayrıca, sınıflandırma ve kırık bölge tespiti ile ilgili mevcut çalışmalarda, genellikle geleneksel görüntü işleme yöntemleri kullanılmıştır. Bu yöntemler, ışık, arka plan ve uzaklık gibi birçok farklı koşullarda performansları değişkenlik gösterebilmektedir. Bu sebeple, gıda sanayisi için geliştirilen gerçek zamanlı uygulamalarda bu tür yöntemler tercih edilmemektedir.

Son zamanlarda, görüntü sınıflandırılması ve nesnelerin konumlarının belirlenmesi için ESA’ya dayalı çalışmalar popüler hale gelmiştir. Bunun nedeni ise, eğitim aşamasında ayırt edici özelliklerin insandan bağımsız olarak çıkartılması ve yüksek performansa sahip olmasıdır. Bu çalışma kapsamında, yumurta yüzeyindeki kırık bölgelerin tespiti için Daha Hızlı Bölgesel Evrimsel Sinir Ağ modeli (DH-BESA) geliştirilmiştir. İlk olarak, kırık yumurta görüntüleri yeniden boyutlandırılmıştır. Daha sonra kırık bölgeler, görüntü üzerinde manuel olarak etiketlenmiş ve konumları belirlenmiştir. Etiketlenen görüntüler, Evrimsel Sinir Ağlara dayalı geliştirilen 16 katmanlı mimarinin girişine uygulanmıştır. Önerilen modeli test etmek için kırık yumurta görüntülerini içeren özgün bir veri seti kullanılmıştır. Deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar, önerilen DH-BESA mimarisinin yüksek performansa sahip olduğunu göstermektedir.

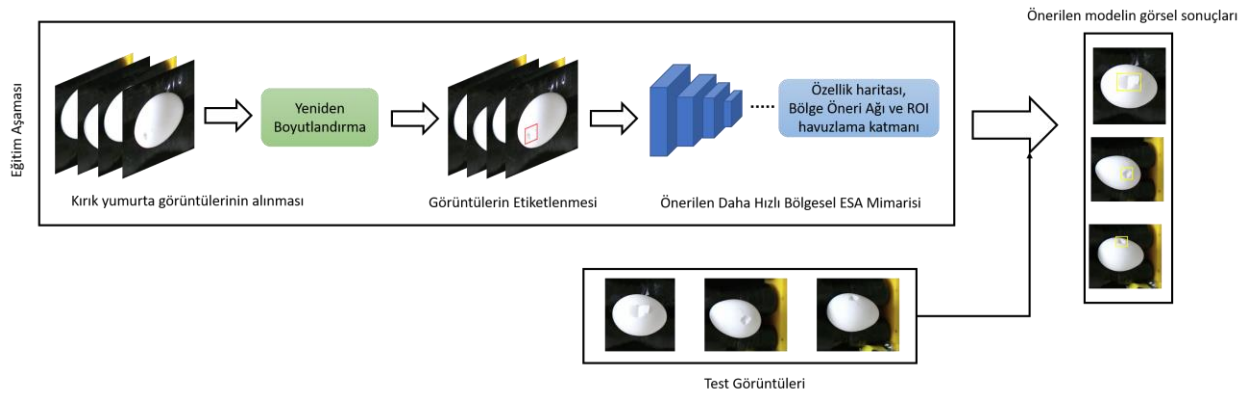
Önerilen modelin ana katkıları aşağıda maddeler halinde verilmiştir. Bunlar:

- Bu çalışmada, kırık yumurta görüntülerini içeren kamuya açık özgün bir veri seti oluşturulmuştur.
- Bu çalışmada, 16 katmanlı Evrimsel Sinir Ağlara dayalı bir model tasarlanmıştır. Önerilen model kullanılarak %95,69 ortalama kesinlik elde edilmiştir.
- Deneysel çalışmalardan elde edilen performans, kırık yumurtaların tespiti için önerilen modelin gıda sanayisinde gerçek zamanlı olarak kullanılabilirliğini göstermiştir.

Çalışma şu şekilde organize edilmiştir. Çalışmanın ikinci bölümünde önerilen modelin teorik alt yapısı ve veri kümesi anlatılmıştır. Üçüncü bölümde önerilen model detaylandırılmıştır. Deneysel sonuçlar dördüncü bölümde verilirken, son bölümde ise sonuçlar ve gelecek çalışmalardan bahsedilmiştir.

## 2. MATERYAL ve METOT (MATERIAL and METHOD)

Bu çalışmada, kırık yumurtalarının tespiti için Bölgesel Evrimsel Sinir Ağlarına (BESA) dayalı bir model sunulmuştur. Önerilen modeli test etmek için geliştirilen kusurlu yumurta tespit cihazına dayalı özgün bir veri kümesi kullanılmıştır. Bu çalışmanın ana işlem adımları Şekil 1’de gösterilmiştir.



Şekil 1. Bu çalışmanın akış diyagramı

Önerilen modelin teorik alt yapısı ve kullanılan veri kümesi alt başlıklar halinde detaylandırılmıştır.

### 2.1. Veri Kümesi (Dataset)

Önerilen çalışma kapsamında geliştirilen kusurlu yumurta tespit makinesi kullanılarak kırık yumurta görüntülerini içeren bir veri seti oluşturulmuştur. Bu kapsamda, 4000x6000 çözünürlüğe sahip 107 kırık yumurta görüntüsü elde edilmiştir. Bu görüntüler, Nikon D7200 fotoğraf makinesi kullanılarak sabit uzaklıktan çekilmiştir. Örnek kırık yumurta görüntüleri Şekil 2’de verilmiştir.





Şekil 2. Örnek kırık yumurta görüntüleri

## 2.2. Evrişimsel Sinir Ağları (Convolutional Neural Networks)

ESA, konvolüsyon katmanı, havuzlama katmanı ve tam bağlı katmanı içeren çok kademeli bir ağ yapısına sahiptir. İleri beslemeli bir sinir ağı modeline dayanan ESA, eğitim aşamasında geri yayılım sayesinde yinelemeli olarak ağırlıklarını güncellemektedir [12-14]. Derin ESA mimarisi, girdi görüntüsünden özellik haritalarının çıkarılması için Denklem 1’de verilen konvolüsyon katmanı ile gerçekleştirir.

$$S[m, n] = (I * K)[m, n] \sum_i \sum_j I(m + i, n + j)K(i, j) \quad 1$$

Burada çıkış matrisinin satır ve sütunları sırasıyla m ve n olarak ifade edilir. Giriş olarak I görüntüsü ve bir K konvolüsyon çekirdeği kullanılarak, S[m,n] konvolüsyon katmanının çıkış görüntüsü oluşturulmaktadır. Elde edilen özellik haritası belirlenen bir aktivasyon fonksiyonundan geçirilmektedir. Bir sonraki aşamada ise aşırı uyumu ortadan kaldırılması için havuzlama katmanı bulunmaktadır. Havuzlama katmanında maksimum, minimum ve ortalama değerler kullanılarak çıktı haritaların alt örneklemeleri elde edilir.  $2 \times 2$  boyutunda maksimum havuzlama fonksiyonu kullanılarak hesaplama, Denklem 2’de gösterildiği gibi formüle edilebilir.

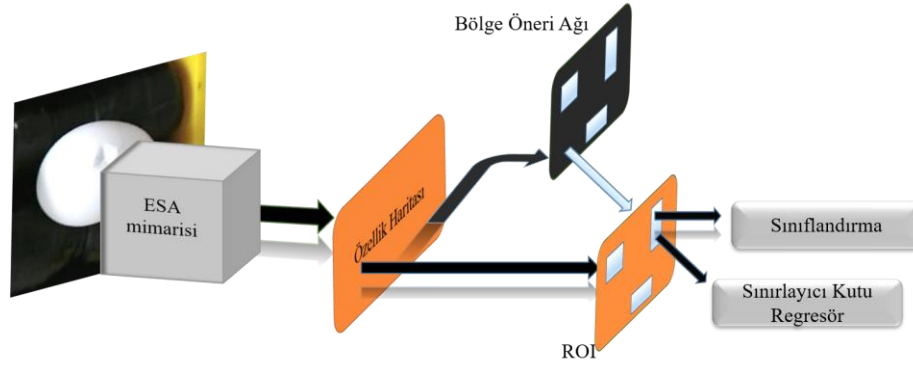
$$f_{havuzlama} = \text{Max}(S_{m,n}, S_{m+1,n}, S_{m,n+1}, S_{m+1,n+1}) \quad 2$$

Konvolüsyon ve havuzlama katmanı işlemleri sonucunda elde edilen özellik haritaları, tam bağlı katman sayesinde tek boyuta indirgenmektedir. Son olarak özellik matrisi, sınıflandırıcıya girdi olarak verilmektedir [12-17].

## 2.3. Daha Hızlı Bölgesel Evrişimsel Sinir Ağları (Faster Regional Convolutional Neural Networks)

Bu çalışmada, veri setindeki görüntü boyutları  $128 \times 128$  olarak yeniden boyutlandırıldı. Bu işlemten sonra, görüntülerdeki yumurta ve kırık bölgelerinin özelliklerinin çıkarılması için bir ESA mimarisi kullanıldı. Bu çalışmada kullanılan DH-BESA, üç ana aşamadan oluşan bir algılayıcıdır. Bu aşamalardan ilki temel adım olarak görüntü özelliklerinin çıkarılması için kullanılan ESA mimarisi, ikincisi nesne sınırlarının tahmini için önerilen bir bölge öneri ağı (RPN) ve son olarak tespit edilen bölgeler için sınırlayıcı kutu regresör (bounding box regressor) ile sınıflandırıcı içeren bir ROI (ilgili alan) kısmından oluşmaktadır [18-19]. Önerilen DH-BESA mimarisinin örnek bir gösterimi Şekil 3’te verilmiştir.





Şekil 3. DH-BESA mimarisinin yapısı

### 3. ÖNERİLEN YÖNTEM (THE PROPOSED METHOD)

Bu çalışmada, yumurta yüzeyindeki kırık bölgeleri tespit etmek için Bölgesel ESA'ya dayalı bir model geliştirilmiştir. Önerilen modelin temel işlem adımları şunlardır:

- Kırık yumurta görüntülerini içeren bir veri seti oluşturuldu.
- Elde edilen görüntüler, 128x128 boyutunda yeniden boyutlandırıldı.
- MATLAB programının Image Labeler araç kutusu kullanılarak yumurta üzerindeki kırık bölgeler etiketlendi.
- Eğitim ve test kümelerine ayırma işlemi yapıldı.
- Evrişimsel Sinir Ağlarına dayalı derin bir mimari tasarlandı ve ağın eğitim işlemi gerçekleştirildi. Daha sonra, kırık bölgelerin doku ve şekil gibi özellik bilgilerini barındıran kırık detektörü elde edildi.
- Son olarak, elde edilen kırık detektörü kullanılarak test aşaması gerçekleştirildi ve önerilen modelin performansı belirlendi.

Bu çalışmada ESA'ya dayalı tasarlanan mimari, konvolüsyon, ReLu, havuzlama ve tam bağlı katmanlardan oluşmaktadır. Bu mimarinin genel yapısı ve karakteristik özellikleri Tablo 2'de detaylandırılmıştır.

Tablo 2. Tasarlanan ESA mimarisinin genel yapısı

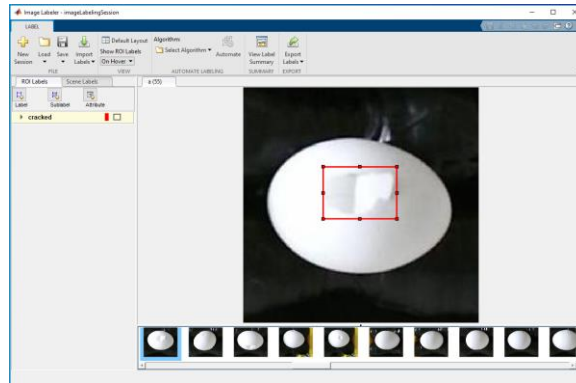
	Ad	Tip	Filtre Boyutu/Stride	Çıkış Boyutu
1	Input_1	Görüntü	-	128x128x3
2	Conv_1	Konvolüsyon	5x5/1	126x126x32
3	Relu_1	ReLU	-	-
4	Conv_2	Konvolüsyon	5x5/1	124x124x64
5	Relu_2	ReLU	-	-
6	Averagepool_1	Havuzlama	3x3/2	61x61x64
7	Conv3_1	Konvolüsyon	5x5/1	59x59x64
8	Relu_3	ReLU	-	-
9	Conv3_1	Konvolüsyon	5x5/1	57x57x32
10	Relu_3	ReLU	-	-
11	Averagpool_1	Havuzlama	3x3/2	28x28x32
12	Fc_1	Tam Bağlı	-	1x1x1024
13	Relu_3	ReLU	-	-
14	Fc_2	Tam Bağlı	-	1x1x2
15	Softmax_1	Softmax	-	2
16	Classoutput	Sınıflandırma Çıkışı	-	-

#### 4. BULGULAR ve TARTIŞMA (RESULTS and DISCUSSION)

Deneyisel çalışmalarda kullanılan bilgisayar, NIDIA Quadro P4000 GPU kartı, Intel Xeon Silver 2.19 GHz ve 32 GB Ram bellek özelliklerine sahiptir. Tüm uygulamalar, MATLAB (R2020a) platformu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Önerilen modelin performans kriteri için duyarlılık ve kesinlik değerlerine dayalı Ortalama Kesinlik (Average Precision-AP) kullanılmıştır. Duyarlılık, pozitif olarak tahmin edilmesi gereken verilerin ne kadarını pozitif olarak tahmin edildiğini gösteren bir kriterdir. Kesinlik ise, pozitif olarak tahmin edilen değerlerin gerçekte ne kadarının pozitif olduğunu gösteren bir kriterdir. Bu değer matematiksel olarak Denklem 3'te verilmiştir.

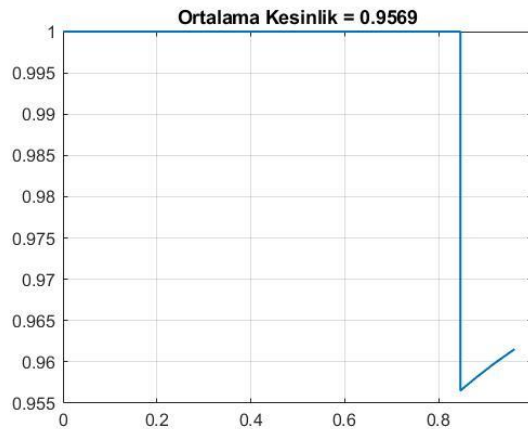
$$\text{Ortalama Kesinlik (AP)} = \sum_{k=1}^{n-1} |Duyarlılık(k) - Duyarlılık(k+1)| * Kesinlik(k) \quad 3$$

Deneyisel çalışmalarda, özgün veri setimiz için rastgele bir şekilde verilerin %80'i eğitim ve geri kalan ise test için kullanılmıştır. Öncelikle, veri seti 128x128 olarak yeniden boyutlandırılmıştır. Daha sonra, Matlab Image Labeler araç kutusu kullanılarak yumurtalardaki kırıklar dikdörtgen bir şekilde etiketlenmiştir. Bu işlem ile ilgili örnek bir gösterim Şekil 4'te verilmiştir.



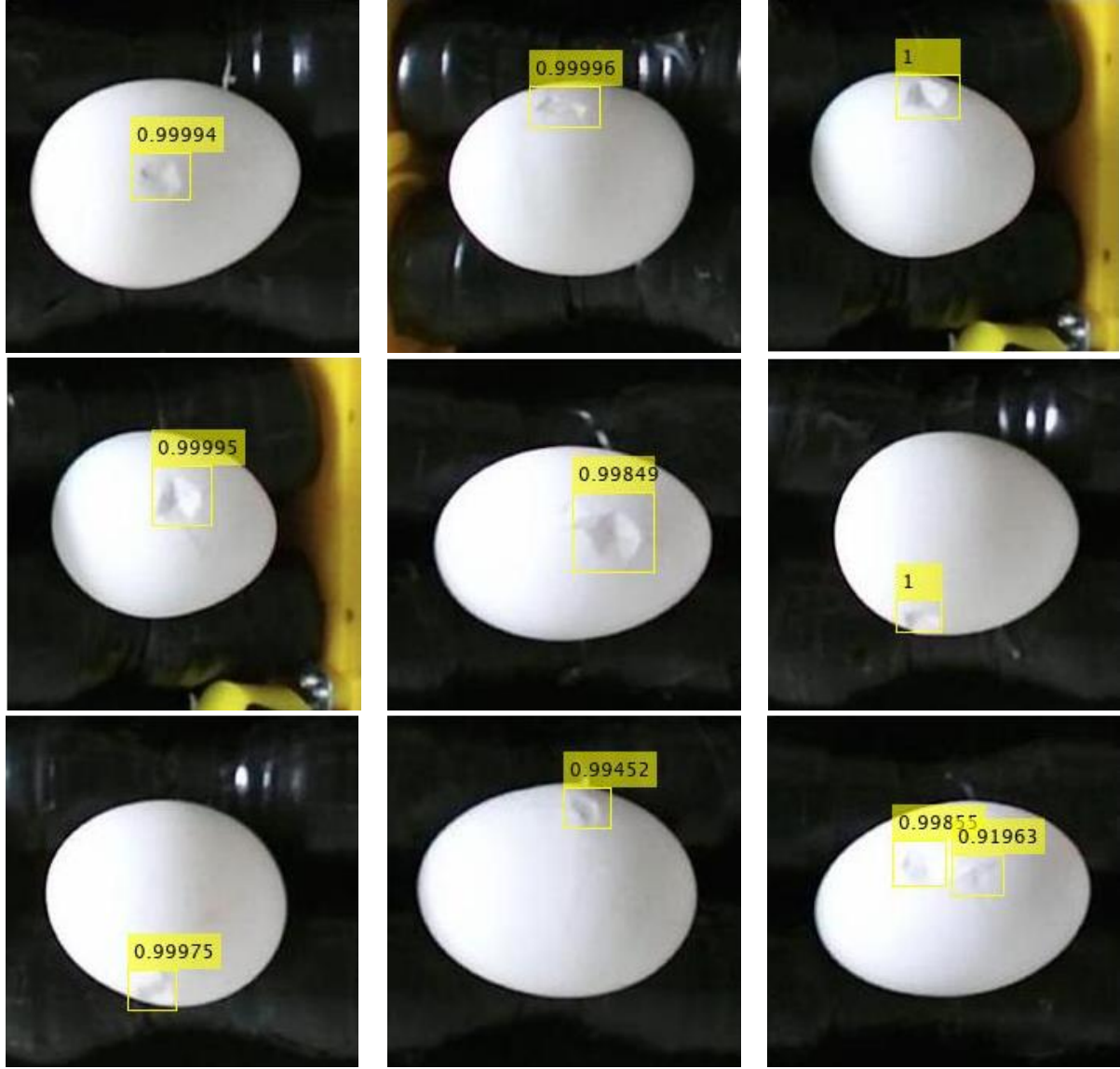
Şekil 4. Image Labeler araç kutusu işlemi

Yumurta görüntülerindeki kırık bölgeler etiklendikten sonra önerilen mimari kullanılarak eğitim işlemi gerçekleştirilmiştir. Önerilen ESA tabanlı mimarinin eğitimi için epoch değeri 50, batch boyutu 1, öğrenme katsayısı  $1 \times 10^{-4}$  ve Stokastik dereceli alçalma tabanlı momentum (stochastic gradient descent with momentum) optimizasyon yöntemi kullanılmıştır. Önerilen ağı eğitimi 5350 iterasyon sonra sona ermiştir. Daha sonra, eğitim aşamasından elde edilen kırık detektörü kullanılarak test işlemi gerçekleştirilmiştir. Önerilen mimari kullanılarak 20 kırık yumurta görüntüsünü içeren test işlemleri kapsamında elde edilen kesinlik/duyarlılık eğrisi Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 5. Deneyisel sonuçlara göre kesinlik/duyarlılık eğrisi

Şekil 5'te verilen kesinlik/duyarlılık eğrisinin altındaki alan ortalama kesinliği (average precision) vermektedir. Sonuç olarak, deneysel çalışmalardan elde edilen ortalama kesinlik %95,69 olarak hesaplanmıştır. Önerilen mimarinin test sonuçları, Şekil 6'da görsel olarak sunulmuştur.



Şekil 6. Önerilen modelin görsel test sonuçları

Şekil 6'daki sarı etiketler, yumurta üzerindeki kırık bölgeleri temsil etmektedir. Etiketler üzerindeki rakamlar ise etiketlenen bölgenin kırık olma ihtimalini göstermektedir. Bu görsel sonuçlara göre, önerilen DH-BESA modeli kullanılarak yumurta yüzeylerindeki kırık bölgeler yüksek performans ile konumları doğru tespit edildiği gözlenmiştir.

Nesne tespiti ya da segmentasyon ile ilgili çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Beyin tümör, araba plakası ve yüz tanıma gibi birçok alanda konum tespit çalışmaları yapılmıştır. Fakat, yumurta yüzeylerindeki kusurlu bölgelerin tespiti veya konum belirleme ile ilgili çalışmalar çok az sayıdadır. Bu çalışmalardan Yang ve ark. [9], yumurta yüzeylerindeki kırık tespiti için görüntü işleme teknikleri ve bulanık mantığa dayalı bir sistem sunmuşlardır. Test işlemi için 55 yumurta örneğine dayalı gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda, %94,55 kesinlik elde etmişlerdir. Diğer bir çalışmada ise daha hızlı bölgesel evrimsel sinir ağlara dayalı bir model kullanılarak %78,17 ortalama kesinlik elde etmişlerdir [11]. Tüm bu sonuçlara göre, önerdiğimiz model, diğer çalışmalara göre daha yüksek performansa sahip olduğu gözlenmiştir. Ayrıca, kapsamlı deneysel çalışmalar gerçekleştirilen bu çalışma, yumurta yüzeylerindeki kırık tespiti ile ilgili yapılacak çalışmalara öncülük edeceği düşünülmektedir.

#### 4. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada, yumurta görüntülerinde kırık bölgelerin otomatik olarak tespiti için Bölgesel tabanlı Evrişimsel Sinir Ağlara dayalı bir model geliştirilmiştir. Önerilen model, konvolüsyon, havuzlama ve relu katmanlarını içeren 16 katmandan oluşmaktadır. Deneysel çalışmalarda, kusurlu yumurta tespit cihazı ile elde edilen 107 kırık yumurta görüntüleri kullanılmıştır. Sonuç olarak, önerilen model, yumurta üzerindeki kırıkların tespitinde %95,69 ortalama kesinlik elde etmiştir. Bu sonuçlar, önerilen modelin gıda sanayisinde otomatik olarak kırık yumurtaların ayrıştırılması amacıyla kullanılabileceğini göstermiştir. İleriki çalışmalarda, daha ince kırık görüntüleri içeren veri kümesinin genişletilmesi düşünülmektedir. Ayrıca önceden eğitilmiş derin mimariler kullanılarak kırık yumurta tespiti yapılması planlanmaktadır.

#### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışma Tubitak 1512 (Teknogirişim Sermayesi Desteği Programı) kapsamında 2180160 nolu proje sonuçlarından hazırlanmıştır. Desteği için TUBİTAK'a teşekkür ederiz.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] N. Öztürk, "Görüntü işleme teknikleri ile beyaz yumurtalar üzerindeki yumurta kabuğu kusurlarının algılanması," Yüksek Lisans Tez, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, Türkiye, 2014.
- [2] İ. Durmuş, E. Yenice and Ş. E. Demirtaş, "Egg abnormality," Tavukçuluk Araştırma Dergisi, vol. 7, no. 1, pp. 66-71, 2007.
- [3] J. Priyadumkol, C. Kittichaikarn, and S. Thainimit, "Crack detection on unwashed eggs using image processing," Journal of Food Engineering, vol. 209, pp. 76-82, 2007.
- [4] N. Öztürk and A. Gangal, "Eggshell defects detection on white eggs using image processing techniques," In 2014 22nd Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), pp. 810-813, 2014.
- [5] M. Omid, M. Soltani, M. H. Dehrouyeh, S. S. Mohtasebi and H. Ahmadi, "An expert egg grading system based on machine vision and artificial intelligence techniques," Journal of food engineering, vol. 118, no. 1, pp. 70-77, 2013.
- [6] B. Guanjun, J. Mimi, X. Yi, C. Shibo and Y. Qinghua, "Cracked egg recognition based on machine vision," Computers and Electronics in Agriculture, vol. 158, pp. 159-166, 2019.
- [7] L. Wu, Q. Wang, D. Jie, S. Wang, Z. Zhu and L. Xiong, "Detection of crack eggs by image processing and soft-margin support vector machine," Journal of Computational Methods in Sciences and Engineering, vol. 18, no. 1, pp. 21-31, 2018.
- [8] Y. Abbaspour-Gilandeh, and A. Azizi, "Identification of Cracks in Eggs Shell Using Computer Vision and Hough Transform," Yüzüncü Yıl Üniversitesi Tarım Bilimleri Dergisi, vol. 28, no. 4, pp. 375-383, 2018.
- [9] J. Yang, C. Y. Xia, H. Pan, Y. Shi, and X. Y. Li, "Research of Test Model for Eggshell Crack Detection," Advanced Materials Research. Vol. 846, Trans Tech Publications Ltd, 2014.
- [10] M. H. Abdullah, S. Nashat, S. A. Anwar and M. Z. Abdullah, "A framework for crack detection of fresh poultry eggs at visible radiation," Computers and Electronics in Agriculture, vol. 141, pp. 81-95, 2017.
- [11] A. K. Datta, B. Botta and S. S. R. Gattam, "Damage detection on chicken eggshells using Faster R-CNN," 2019 ASABE Annual International Meeting. American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2019.

- [12] Q. Li, and G. Chen, "Recognition of industrial machine parts based on transfer learning with convolutional neural network," Plos one, vol. 16, no. 1, pp. e0245735, 2021.
- [13] M. Turkoglu, "COVIDetectioNet: COVID-19 diagnosis system based on X-ray images using features selected from pre-learned deep features ensemble," Applied Intelligence, pp. 1-14, 2020.
- [14] S. K. Khare, and V. Bajaj, "Time-frequency representation and convolutional neural network-based emotion recognition," IEEE transactions on neural networks and learning systems, pp. 1-9, 2020.
- [15] F. Demir, M. Turkoglu, M. Aslan, and A. Sengur, "A new pyramidal concatenated CNN approach for environmental sound classification," Applied Acoustics, vol. 170, pp. 107520, 2020.
- [16] D. Şengür and S. Siuly, "Efficient approach for EEG-based emotion recognition," Electronics Letters, vol. 56, no. 25, pp. 1361-1364, 2020.
- [17] M. B. ER, "Akciğer Seslerinin Derin Öğrenme ile Sınıflandırılması," Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji, vol. 8, no. 4, pp. 830-844, 2020.
- [18] Y. Guo, Y. Peng and B. Zhang, "CAFR-CNN: coarse-to-fine adaptive faster R-CNN for cross-domain joint optic disc and cup segmentation," Applied Intelligence, pp. 1-25, 2021.
- [19] S. Ren, K. He, R. Girshick and J. Sun, "Faster R-CNN: towards real-time object detection with region proposal networks," IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence, vol. 39, no. 6, pp. 1137-1149, 2016.