

## Effects of Drawing Techniques on Designers' Creativity, Integration, Conceptualization and Application Skills

 Filiz ŞENLER<sup>1</sup>  Kemal YILDIRIM<sup>2,\*</sup> 
<sup>1</sup> TOBB ETU University Faculty of Architecture and Design, Department of Visual Communication Design, 06510, Söğütözü/ANKARA

<sup>2</sup> Gazi University Faculty of Technology, Department of Woodworking Industrial Engineering, 06500, Yenimahalle/ANKARA

### Graphical/Tabular Abstract

The results obtained and the suggestions developed for this study, which are carried out in order to determine the views of the drawing techniques on the creativity / originality, integration, conceptualization and application skills of design educators and students, are explained in a systematic order below.

#### Article Info:

Research article

Received: 25/02/2020

Revision: 27/03/2020

Accepted: 27/03/2020

#### Highlights

- Student success.
- Drawing techniques.
- Computer lab.

#### Keywords

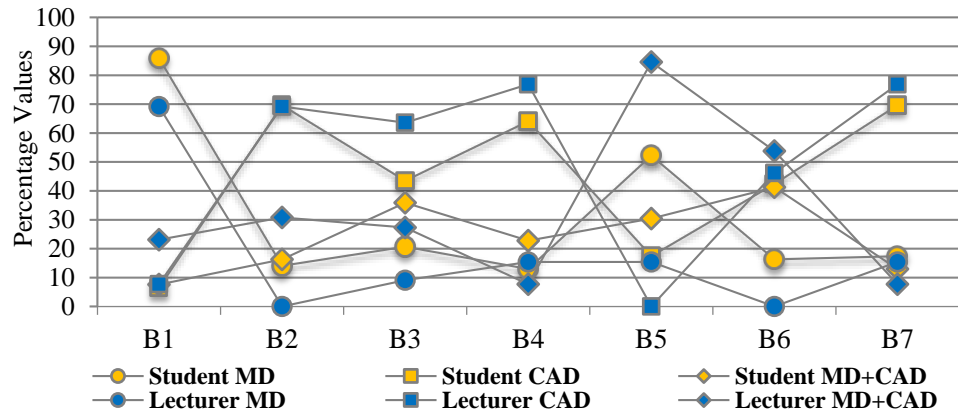
 Drawing Techniques  
 Creativity  
 Integration  
 Conceptualization  
 Application


Figure A. The effects of drawing techniques on designers' integration skills

**Purpose:** In this research, the effects of the opportunities and innovations offered by digital design technologies commonly used in the field of design on the creativity / originality, integration, conceptualization and application skills that constitute the performance of the designers were investigated.

**Theory and Methods:** In the study, the effects of manual drawing (MD) and computer aided design (CAD) techniques used in the design process on the performance of designers in design studios affected by digital technology were examined. In the research questionnaire, there are 34 questions in total with three options to learn the effects of drawing techniques on design performance of design educators and students.

**Results:** The results obtained from the questionnaire show that when MD + CAD techniques are used together in design studios, students may have more positive effects on design performance.

**Conclusion:** As a result, in shaping of the design studio process, the use of MD + CAD techniques together with the MD technique in the design process makes it possible to obtain more positive and successful results on the designers' creativity, integration, conceptualization and application skills. The important thing is to reveal the importance of the application skills while detailing the stages. In this respect, it is extremely important to know the effects of using MD + CAD techniques together on the design process of application skills.



## Tasarımcıların Yaratıcılık, Bütünleştirme, Kavramsallaştırma ve Uygulama Becerileri Üzerine Çizim Tekniklerinin Etkileri

Filiz ŞENLER<sup>1</sup> Kemal YILDIRIM<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup> TOBB ETÜ Üniversitesi Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, Görsel İletişim Tasarımı Bölümü, 06510, Söğütözü/ANKARA

<sup>2</sup> Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi, Ağaçşileri Endüstri Mühendisliği Bölümü, 06500, Yenimahalle/ANKARA

### Öz

Bu araştırmada, tasarım alanında yaygın olarak kullanılan dijital tasarım teknolojilerinin sunduğu imkânların ve yeniliklerin, tasarımcıların performansını oluşturan yaratıcılık/özgünlük, bütünleştirme, kavramsallaştırma ve uygulama becerileri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Çalışmada, dijital teknolojilerin etkilediği tasarım stüdyolarında, tasarım sürecinde kullanılan manuel çizim (MD) ve bilgisayar destekli tasarım (CAD) tekniklerinin, tasarımcıların performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Araştırma anketinde, çizim tekniklerinin tasarım eğitimcileri ve öğrencilerinin tasarım performansı üzerindeki etkilerini öğrenmek için üç seçeneğe toplamda 34 soru bulunmaktadır. Anketten elde edilen sonuçlar, tasarım stüdyolarında MD+CAD tekniklerinin birlikte kullanıldığı durumlarda, öğrencilerin tasarım performansı üzerinde daha olumlu etkilerinin olabileceğini göstermektedir.

### Makale Bilgisi

Araştırma makalesi  
Başvuru: 25/02/2020  
Düzeltilme: 27/03/2020  
Kabul: 27/03/2020

### Anahtar Kelimeler

Çizim Teknikleri  
Yaratıcılık  
Bütünleştirme  
Kavramsallaştırma  
Uygulama

### Keywords

Drawing Techniques  
Creativity  
Integration  
Conceptualization  
Application

### Effects of Drawing Techniques on Designers' Creativity, Integration, Conceptualization and Application Skills

### Abstract

In this research, the effects of the opportunities and innovations offered by digital design technologies commonly used in the field of design on the creativity / originality, integration, conceptualization and application skills that constitute the performance of the designers were investigated. In the study, the effects of manual drawing (MD) and computer aided design (CAD) techniques used in the design process on the performance of designers in design studios affected by digital technology were examined. In the research questionnaire, there are 34 questions in total with three options to learn the effects of drawing techniques on design performance of design educators and students. The results obtained from the questionnaire show that when MD + CAD techniques are used together in design studios, students may have more positive effects on design performance.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Dünyada yaşanan ekonomik, sosyal, kültürel, çevresel ve teknolojik değişimlere paralel olarak tasarım eğitiminde de bir dönüşüm yaşanmaktadır. Gerçekleşen bu değişimlerden en çok etkilenen tasarım eğitiminin deneyim ortamı olan stüdyolardır. Stüdyo eğitiminin temel amacı tasarımcı adaylarının yaratıcı potansiyellerini, yaratıcı düşünce ve tutumlarını geliştirmektir. Stüdyolarda yaratıcı düşünme tekniklerinin öğretilmesi ve tasarım sürecinin deneyimlenmesi yoluyla tasarımcı adaylarının yaratıcı sorun çözme yetenekleri güçlendirilir. Tüm bu deneyimler aracılığı ile bireylerin yaratıcı kişilik özellikleri kuvvetlenir ve bu yaratıcı süreç, yaratıcı kişi ile birlikte yaratıcı ürünün potansiyelini ortaya çıkarmaya hizmet eder [1]. 21. yüzyılın tasarım eğitimcisi, tasarımcıları, öğrencileri - bilişsel psikolojiden edebiyat eleştirisine, yapısal dilbilimden siyaset felsefesine kadar - birçok fikir ve alandan beslenmek durumundadır. Tasarımcıların/adayların bu tür alanlardan beslenerek öğrenecek çok şeyi bulunmaktadır.

Bugünden yarına tasarım alanına adım atacak olan adaylar, hayatın her aşamasını etkileyen teknolojik gelişmeler karşısında alanlarında uzmanlaşmak ve kendilerini sürekli değişen benzersiz ve evrensel bir sürece hazırlamak zorundadırlar. Gelişen teknoloji ile birlikte insanların kullandığı birçok materyal, ürün, eşya vb. sürekli değişime uğramaktadır [2]. Bu temelde, teknolojinin gelişmesine temel oluşturan toplumsal ortam ve kaynaklar ile toplumun gereksinimlerinin bir bütün olarak ele alınması, tasarım sürecinin sağlıklı bir şekilde gelişimine katkı sunabilecektir.

Tasarım alanında yaygın olarak kullanılan dijital tasarım teknolojilerinin sunduğu imkânların ve yeniliklerin, tasarımcıların yaratıcılık/özgünlük, bütünleştirme, kavramsallaştırma ve uygulama becerileri üzerindeki etkileri yeterince araştırılmamıştır ve halen akademik ortamlarda bu konudaki tartışmalar devam etmektedir. Bu belirsizliğe ışık tutabilme adına, tasarım sürecinin şekillenmesinde, manuel (elle) çizim (MD) tekniğinin yanında, son dönemde artırılmış sanal gerçeklik teknolojisini de içine alan bilgisayar destekli tasarım (CAD) tekniğinin tasarımcıların yaratıcılık, bütünleştirme, kavramsallaştırma ve uygulama becerileri üzerindeki etkisi sorgulanabilir. Belki de, tasarım sürecinde MD+CAD tekniklerinin birlikte kullanımı yaratıcı inovatif yaklaşımlarla desteklendiği takdirde, tasarımcıların yaratıcılık, bütünleştirme, kavramsallaştırma ve uygulama becerileri üzerinde daha olumlu ve başarılı sonuçların alınmasını sağlayabilir. Bu yönüyle, MD, CAD ve MD+CAD tekniklerinin tasarım süreci üzerindeki etkilerinin bilinmesi, ortaya çıkabilecek birçok problemin çözümüne farklı açılardan ışık tutabilir.

### 1.1. Teorik Alt Yapı ve Hipotez Geliştirme (Theoretical Background and Hypothesis Development)

Günümüz tasarım eğitiminde bilgiye hızlı ve kolay ulaşma kaygısı oldukça hâkimdir ve kabul gören hazır örneklemelerin yaygınlığı, çoğunlukla özgünlükten hızla uzaklaşılmasına neden olabilmektedir.

Tasarım sürecinin erken aşamalarında problemin ve çözüm alanlarının gereksinimlerinin ve koşullarının araştırılmasını sağlayan skeçler gibi nispeten yapılandırılmamış çeşitli resimsel temsil biçimlerinin kullanılması olasıdır [3]. Tasarım geliştikçe, planlar ya da kesitler gibi diğer daha yapılandırılmış formlar da sürecin bir parçası haline gelir [4]. Evrensel açıdan, sürecin bu kısmı teknik çizim veya taslak olarak adlandırılır. Çizim, iç tasarım ve ilgili disiplinlerde ortak bir dildir. Örneğin, çizim bir iç mekân tasarımcısının tasarlayacağı mekânın organizasyonuna, donatı ve yardımcı elemanların görselleştirilmesine/ifadelendirilmesine izin verir. Tasarım eğitimi, tasarım disiplinlerindeki öğrenciler için daha fazla organize olmak ve eğitim sistemindeki standartlara uymak için gereklidir. Bununla birlikte, hem konuların anlaşılması hem de uygulama aşaması için tasarım sürecinde bilginin işlenmesi oldukça önemlidir [5].

1900'lerin başından bu yana, çizim yükseköğretimde sadece pratik kullanım olarak değil, aynı zamanda bir bilişsel gelişim aracı ve “güçlü bir hesaplama motoru” olarak da kabul edilmektedir [6]. 1960'ların ortalarında, CAD tekniği, geleneksel çizim araçları kullanılmadan çizimlerin çıktısı için bir araç olarak tanıtıldı. Teknolojik gelişmeler, zaman içinde geleneksel çizim araçlarından, CAD kullanımına kademeli bir geçişe neden olmuştur. Bugün, dünyadaki hemen hemen her kurum ve sektördeki çalışanlar, işyerlerinde geçmişe göre daha fazla CAD tekniğini kullanmaktadırlar [7]. Özellikle 1990'lı yıllardan itibaren bilgisayar teknolojisi, eğitimde tasarım sürecinin temel bir parçası haline geldiğinden, tasarım eğitimcileri tarafından CAD ve MD tekniklerinin görselleştirme yeteneğinin birbirinden nasıl farklılaştığı hakkında çok sayıda tartışma yapılmıştır. Brandon ve McLain-Kark [8], çalışmalarında nihai tasarım çözümlerinde mevcut olan tasarım değerlerinin görünüşlerinin değerlendirmeleri üzerine gelişimsel tasarım sürecinde MD ve CAD tekniklerinin kullanımını karşılaştırmışlardır. Çalışmada, MD ve CAD tekniklerinin tasarım değerlerinin değerlendirmeleri arasında anlamlı bir farklılık olmadığı sonucuna varılmıştır. Ancak MD ve CAD teknikleri, tasarım sürecinin kavramsallaştırma aşamasında, uygun, karmaşık, yaratıcı, yeni, sevimli, orijinal ve tematik olarak etkileyici tasarım çözümleri üretmek için etkili olmuştur.

MD tekniği için daha geniş bir sanat anlayışı, mekânsal farkındalık, görselleştirme ve ön planlama konusunda gelişmiş beceriler gereklidir [6]. Bunun yanında, daha büyük bir başarı ve sahiplenme duygusu yaratır. Karmaşık objelerin daha doğru çizimlerini yapmak için uzun zaman ve teknik beceri gereksinimi MD tekniğinin olumsuz yönleridir [9]. Bu tekniğin kesinlikle düz ve pürüzsüz bir yüzeye ihtiyacı vardır ve çok fazla konsantrasyon gerektirir [5]. Diğer taraftan, daha yüksek bir doğruluk

derecesi, zaman kaybında azalma ve taslak çalışması ve MD tekniğinden daha hızlı ve daha doğru olması, CAD tekniğinin avantajlarıdır. Sonuçta, CAD tekniği ile bir projenin tamamlanması daha az zaman almaktadır [10]. CAD yazılımı, çizim, skeç, render oluşturma, fotoğraf modifikasyonu ve üç boyutlu özellikleri destekler. AutoCAD gibi CAD yazılımı genellikle revizyonların hazırlanması ve mimari çizimleri ile spesifikasyon belgelerinin üretildiği daha sonraki tasarım süreci aşamalarına dâhil edilmiştir [8]. 2D programların kullanımı, çizimlerde değişiklik yaparken tekrarlanan görevlerin hızını önemli ölçüde artırabilir [11]. Diğer taraftan, CAD tekniği öğrencileri çizilenleri yeterince keşfetmeden aceleyle tasarımlarını sonuçlandırmaya zorlamaktadır [6]. Ayrıca, göz yorgunluğu, gerekli ekipmanda artış ve ilave çalışma giderleri tekniğin olumsuz yönleridir. Özkan ve Yıldırım [5] çalışmalarında, MD ve CAD tekniklerinin tasarım öğrencilerinin çizim performansı üzerindeki etkileri irdelenmiş, hangi çizim tekniğinin daha fazla zaman, hız ve kalite bakımından verimli olduğu belirlenmiştir. Çizim sürecinin ilk aşamasında CAD tekniğinin, MD tekniği ile aynı düzeyde ve aynı kalitede sonuç verdiği, fakat 60. dakikanın sonunda MD tekniği ile CAD tekniği arasında büyük farklılıklar olduğu görülmüş ve sonuçta bu çalışmada CAD tekniğinin, MD tekniğine göre daha başarılı olduğu ileri sürülmüştür. Farklı bir çalışmada Yıldırım ve Hidayetoğlu [12], hem MD hem de CAD ortamında tasarım öğrencilerinin çizim yaparken belirli anatomik noktalarındaki rahatsızlık düzeylerini tespit etmişlerdir. Bu çalışmada, her iki çizim tekniğinde de zamana bağlı olarak öğrencilerin rahatsızlık düzeylerinin arttığı, bununla birlikte CAD tekniğinin, MD tekniğine kıyasla ergonomik açıdan daha olumlu bir ortam sağladığı bildirilmiştir.

Tasarım sürecinde MD ve CAD tekniklerinin etkileri üzerine birçok çalışma yapılmıştır [5,8,13,14]. Çizim yöntemlerinin verimliliğini artırmak için MD ve CAD sistemlerinin stratejik kullanımları [15-17] ve ayrıca mühendislik alanında CAD tekniğinin etkileri üzerine çalışmalar da bulunmaktadır [18-20]. Bununla birlikte, tasarım sürecinin yanı sıra, özellikle mobilya ve iç mekân tasarım eğitiminde MD ve CAD tekniklerinin başarısı ve zaman tasarrufu alanında nispeten daha fazla çalışma yapılmıştır. Herhangi bir tasarım projesinde, çizim performansı ve başarısı, özellikle profesyonel yaşama yönelik eğitim ortamlarında tasarım süreci kadar önemlidir. Bazı çalışmalar CAD tekniğinin MD tekniğine göre daha hızlı ve daha kesin sonuçlar verdiğini göstermektedir [5].

Yukarıdaki literatür ışığında araştırmanın amacına uygun olarak geliştirilen araştırma hipotezleri aşağıda verilmiştir.

- H1. Tasarım sürecinde kullanılan çizim tekniklerinin tasarımcıların yaratıcılık/özgünlük becerileri üzerinde farklı etkileri vardır.
- H2. Tasarım sürecinde kullanılan çizim tekniklerinin tasarımcıların kavramsallaştırma becerileri üzerinde farklı etkileri vardır.
- H3. Tasarım sürecinde kullanılan çizim tekniklerinin tasarımcıların bütünleştirme becerileri üzerinde farklı etkileri vardır.
- H4. Tasarım sürecinde kullanılan çizim tekniklerinin tasarımcıların uygulama becerileri üzerinde farklı etkileri vardır.
- H5. Tasarım eğitimcileri ve öğrencilerinin tasarımlarda kullanılan çizim tekniklerinin yaratıcılık, bütünleştirme, kavramsallaştırma ve uygulama becerileri üzerindeki etkilerine yönelik değerlendirmeleri arasında anlamlı farklılıklar vardır.

## 2. YÖNTEM (METHOD)

Bu çalışmada, yukarıda ileri sürülen araştırma hipotezlerini test etmek için aşağıdaki yöntemler kullanılmıştır.

### 2.1. Katılımcıların Özellikleri (Participants' Features)

Bu çalışmada kullanılan veriler, iki farklı katılımcı grubundan elde edilmiştir. İlk grupta araştırma anketine TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Mimarlık ve Tasarım Fakültesinde tasarım eğitimi gören 57 kız (%62) ve 35 erkek (%38) öğrenciden oluşan toplam 92 kişi katılmıştır. İkinci grupta ise araştırma anketine Gazi Üniversitesi, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Atılım Üniversitesi, Selçuk Üniversitesi, Hacettepe Üniversitesi ve Nuh Naci Yazgan Üniversitesinde CAD ve tasarım

stüdyosu derslerini veren 16 kız (%57,1) ve 12 erkek (%42,9) öğretim üyesinden oluşan toplam 28 kişi katılmıştır.

## 2.2. Anketin Tasarımı ve Prosedür (Survey Design and Procedure)

Anketin tasarımında; Özkan ve Yıldırım [5], Yıldırım ve Hidayetoğlu [12], Yıldırım ve Kasal [13], Yıldırım, Çapanoğlu ve Çağatay [21], Kırıcı ve Yıldırım [22], Gökbulut ve Yıldırım [23], Yıldırım, Hidayetoğlu, Gökbulut ve Müezzinoğlu [24] tarafından yapılan daha önceki araştırmalarda geçerli ve güvenilir bulunmuş anketlerden faydalanılmış ve geliştirilen ayrıntılı anket yardımıyla araştırma hipotezleri ölçülmüştür.

Anket, iki ana başlıkta değerlendirilmiştir: (1) Katılımcıların demografik özellikleri ile ilgili sorular (bölüm, cinsiyet, yaş vb.) ile (2) tasarım sürecinde kullanılan MD, CAD ve MD+CAD tekniklerinin tasarım eğitimcileri ve öğrencilerinin yaratıcılık/özgünlük, bütünleştirme, kavramsallaştırma ve uygulama becerileri üzerindeki etkilerinin ölçülmesine yönelik sorulardır. Çizim tekniklerinin tasarım eğitimcileri ve öğrencilerinin tasarım performansını oluşturan yaratıcılık/ özgünlük, bütünleştirme, kavramsallaştırma ve uygulama becerileri üzerindeki etkilerine yönelik görüşlerini belirlemek için üç seçenekli toplamda 34 soru hazırlanmıştır. Bu sorular sırasıyla aşağıda verilmiştir.

Yaratıcılık / Özgünlük (Y1:Güçlü ve yaratıcı yanlar öne çıkıyor., Y2:Duyular harekete geçiyor., Y3:Estetik kaygı ön plana çıkıyor., Y4:Görme ve duymanın yanında dokunsallıkta yaşıyor., Y5:Salt biçime dayalı iletişimden de yoksun bir fikir ortaya çıkıyor., Y6:Hem biçim hem içerik açısından tatmin edici oluyor. Y7:Tasarım fikri geliştirme aşamasında çizim yeteneği önem kazanıyor., Y8:Özgün fikirler olduğu takdirde, yaratıcı bir tasarım süreci yaşıyor., Y9:İmge (görüntü, ses) bombardımanı yaşıyor., Y10:Çok seçenek oluyor., Y11:Farklı seçeneklerden etkilenilmesinden dolayı özgünlükten uzaklaşıyor., Y12:Hızda problem yaşıyor., Y13:Tasarımda içerik oluşturmayı kolay hale getiriyor., Y14:Yaratıcılık ve özgünlük olmadan var olanı yeniden üretmiş gibi sunmayı sağlıyor., Y15:Birey yaratıcı güce sahip ise özgün skeç ve fikirler çıkarabiliyor.).

Bütünleştirme (B1:Yaratıcı süreçte; kâğıt, kalem ve boya ile bütünleşme yaşıyor., B2:Problem karşısında (çizim yeteneği sınırlı ise) hızlı sonuç alma yanılıgısı ile dijital ortama bağlı kalarak bütünleşme yaşıyor., B3:Birbirinden bağımsız fikirleri bütün gibi algılama / algılatma oluyor., B4:Hazır olanın tüketilmesiyle, özgün ve bütünlüğü olmayan tasarımlar oluyor., B5:Çizim yeteneği varsa, tasarım sürecinde hızlı bütünleştirici sonuç alınıyor., B6:İş ve eğitim ortamında bütünleştirici eylemlerin hızı önem kazanıyor., B7:Skeç fikri uzak kalıyor.).

Kavramsallaştırma (K1:Aşamaları detaylandırma ve kavramsallaştırmada olumlu ilerleme sağlanıyor., K2:Beş duyuya hitabeden bir imge yaratılabiliyor., K3:Problem karşısında kavram geliştirme sürecinde çizim yeteneği, yaratıcı gücü yok ya da sınırlı ise sorunlarla çıkmaza girilebiliyor., K4:Süreç sağlıklı yaşanmadığı için kavramsallaştırma konusu da güdük kalıyor., K5:Yöntem ve problemin çözümü sağlıklı işliyor., K6:Kavramsallaştırma ve tasarım süreci ile birlikte, yazılım programlarının hangisinin kullanılması gerektiği konusunda sağlıklı ve hızlı sonuca ulaşılabilir.).

Uygulama (U1:Tasarım süreci istenildiği şekilde ilerlerse sağlıklı bir sonuca gidiliyor., U2:Tasarım sürecinin ardından hızla sonuca ulaşmak planlı şekilde işliyor., U3:Temel tasarımın çeşitlendirmelerinden olan renk ve doku kavramlarının devreye girmesi süreci zenginleştiriyor., U4:Problem karşısında çizim yeteneği sınırlı ya da yok ise, uygulama adına ortaya herhangi bir şey konulamamış ise çıkmaza girilebiliyor., U5:Ögenin; konumuyla, boyutuyla, rengiyle kolaylıkla oynanabiliyor olması sayesinde aynı ögenin/imgenin çok sayıda türeviyle uygulamalar geliştirmek mümkün oluyor., U6:Uygulama aşamasında yöntemin sağladığı olanakları araç olarak kullanıldığı takdirde, olumlu ve hızlı sonuca gidilebiliyor.).

Araştırma verileri, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesinde tasarım eğitimi gören öğrenciler arasından tesadüfi yöntemle seçilen 92 katılımcı ile Gazi Üniversitesi, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Atılım Üniversitesi, Selçuk Üniversitesi, Hacettepe Üniversitesi ve Nuh Naci Yazgan Üniversitesinde CAD ve tasarım stüdyosu derslerini veren 28 öğretim üyesinden elde edilmiştir. Veriler; anket uygulama şeklinde elde edilmiş, 2018 yılında bir aylık bir sürede ve hafta içinde mesai saatlerinde toplanmıştır. Katılımcılar, anketi yaklaşık 15 dakikada tamamlamışlardır.

### 2.3. İstatistikî Değerlendirme (Statistical Evaluation)

Bu çalışma, tasarım stüdyosu sürecinde kullanılan çizim yöntemlerinin TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesinde tasarım eğitimi gören öğrenciler ile çeşitli üniversitelerde CAD ve tasarım stüdyosu derslerini veren öğretim üyelerinin yaratıcılık/özgünlük, bütünleştirme, kavramsallaştırma ve uygulama becerileri üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesine yönelik sorulara bağımlı değişken olarak kabul edilmiştir. Katılımcıların statüsü ise (öğrenci ve öğretim üyesi) bağımsız değişken olarak kabul edilmiştir. Araştırmada elde edilen verilerin anlaşılabilirliği ve aynı yollarla elde edilmiş verilerle karşılaştırılabilirliği amacıyla, araştırma verilerinin yüzdelerle hesaplanmış, verilerin Cronbach Alpha güvenilirlik testleri yapılmış, bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki farklılıkların istatistiksel açıdan  $P < 0,05$  düzeyinde anlamlı olup olmadığı ise Ki Kare ( $X^2$ ) testi ile analiz edilmiştir.

### 3. BULGULAR (RESULTS)

Bu çalışmada, tasarım stüdyosu sürecinde kullanılan MD, CAD ve MD+CAD tekniklerinin tasarım eğitimcilerinin ve öğrencilerinin yaratıcılık/özgünlük, bütünleştirme, kavramsallaştırma ve uygulama becerileri üzerindeki etkilerine yönelik görüşlerinin değerlendirmesinden elde edilen bulgular sistematik bir sırayla aşağıda verilmiştir.

#### 3.1. Güvenilirlik Testi Bulguları (Reliability Test Findings)

Bu çalışmadan elde edilen verilerin güvenilirliği “Cronbach alfa” ile test edilmiş olup, elde edilen sonuçlara göre, tasarım performansı değerlendirmelerini kapsayan ana ölçeğin güvenilirlik katsayısı 0,76, yaratıcılık/özgünlük ölçeğinin 0,68, bütünleştirme ölçeğinin güvenilirliği 0,60, kavramsallaştırma ölçeğinin güvenilirliği 0,60 ve uygulama ölçeğinin ise 0,65 olarak tespit edilmiştir. Daha önce Cronbach [25], Kaplan ve Saccuzzo [26] ve Panayides [27] tarafından yapılan çalışmalarda tüm unsurlar için alfa güvenilirlik katsayıları 0,60’ın üzerinde çıktığında “güvenilir” olarak kabul edilebileceği bildirilmiştir. Bu çalışmada elde edilen Cronbach alfa katsayılarının belirtilen değerin üzerinde olduğu görülmektedir. Buna göre, elde edilen veriler “güvenilir” olarak kabul edilebilir.

#### 3.2. Çizim Tekniklerine İlişkin Bulgular (Findings Related to Drawing Techniques)

İlk olarak manuel çizim (MD), bilgisayar destekli tasarım (CAD) ve manuel + bilgisayar destekli tasarım (MD+CAD) tekniklerinin tasarımcıların yaratıcılık/özgünlük becerileri üzerindeki etkilerine ilişkin veriler analiz edilmiş olup, elde edilen verilerin yüzdelerle hesaplanmış, verilerin Kikare testi sonuçları Tablo 1’de verilmiştir.

**Tablo 1.** Çizim tekniklerinin tasarımcıların yaratıcılık/özgünlük becerileri üzerindeki etkileri

Bağımlı Değişkenler	Öğrenci						Öğretim Üyesi						Kikare Testi Sonuçları		
	MD		CAD		MD+CAD		MD		CAD		MD+CAD		$X^2$	df	Sig.
	f	%	f	%	f	%	f	%	f	%	f	%			
Y1	44	47,8	11	12	37	40,2	18	64,3	-	-	10	35,7	4,585	2	0,101 <sup>ns</sup>
Y2	56	60,9	16	17,4	20	21,7	16	61,5	-	-	10	38,5	6,753	2	0,034 <sup>*</sup>
Y3	46	50	24	26,1	22	23,9	12	42,9	6	21,4	10	35,7	1,534	2	0,464 <sup>ns</sup>
Y4	60	65,2	14	15,2	18	19,6	14	53,8	-	-	12	46,2	10,011	2	0,007 <sup>*</sup>
Y5	25	27,2	52	56,5	15	16,3	4	16,7	18	75	2	8,3	2,743	2	0,254 <sup>ns</sup>
Y6	8	8,7	27	29,3	57	62	2	7,1	2	7,1	24	85,7	6,637	2	0,044 <sup>*</sup>
Y7	54	58,7	18	19,6	20	21,7	24	85,7	-	-	4	14,3	8,485	2	0,014 <sup>*</sup>
Y8	35	38	20	21,7	37	40,2	10	35,7	-	-	18	64,3	8,831	2	0,012 <sup>*</sup>
Y9	9	9,8	65	70,7	18	19,6	8	30,8	10	38,5	8	30,8	10,657	2	0,005 <sup>*</sup>
Y10	11	12	46	50	35	38	4	14,3	16	57,1	8	28,6	0,843	2	0,656 <sup>ns</sup>
Y11	16	17,4	57	62	19	20,7	4	15,4	20	76,9	2	7,7	2,657	2	0,265 <sup>ns</sup>
Y12	67	72,8	13	14,1	12	13	16	57,1	12	42,9	-	-	12,919	2	0,002 <sup>*</sup>
Y13	19	20,7	44	47,8	29	31,5	10	35,7	8	28,6	10	35,7	3,968	2	0,138 <sup>ns</sup>
Y14	8	8,7	68	73,9	16	17,4	2	7,7	22	84,6	2	7,7	1,579	2	0,454 <sup>ns</sup>
Y15	45	48,9	17	18,5	30	32,6	18	64,3	2	7,1	8	28,6	2,819	2	0,244 <sup>ns</sup>

Not:  $X^2$ : Kikare değeri, df: Serbestlik derecesi,  $*P < 0,05$  düzeyinde önemlidir. ns:  $P < 0,05$  düzeyinde önemsizdir.

f: Frekans Sayısı, %: Yüzdelerle Değer, MD: Manuel Çizim, CAD: Bilgisayar Destekli Çizim.

Tablo 1’de verilen değerlere göre, çizim tekniklerinin tasarımcıların yaratıcılık/özgünlük becerileri üzerindeki etkilerine yönelik değerlendirmeleri arasında istatistiksel açıdan önemli farklılıkların olduğu açıkça görülmektedir. Öğrenci ve öğretim üyelerinden oluşan katılımcıların değerlendirmeleri arasında istatistiksel açıdan bir farklılık olup olmadığını ANOVA ile test edilmiştir. Buna göre, çizim tekniklerinin katılımcıların tasarım performansını oluşturan yaratıcılık/özgünlük becerileri üzerindeki etkilerini ölçmeye yönelik unsurların değerlendirmelerini kapsayan bağımlı değişkenler arasındaki farklılıklar “Y2: Duyular harekete geçiyor”, “Y4: Görme ve duymanın yanında dokunsallıkta yaşanıyor”, “Y6: Hem biçim hem içerik açısından tatmin edici oluyor”, “Y7: Tasarım fikri geliştirme aşamasında çizim yeteneği önem kazanıyor”, “Y8: Özgün fikirler oluştuğu takdirde, yaratıcı bir tasarım süreci yaşanıyor”, “Y9: İmge (görüntü, ses) bombardımanı yaşanıyor” ve “Y12: Hızda problem yaşanıyor” unsurları için istatistiksel açıdan  $P < 0,05$  düzeyinde anlamlı bulunmuştur. Buna göre, katılımcıların değerlendirmeleri arasında yedi unsur için farklılıklar olduğu görülmektedir. Tablo 1’de verilen sonuçlar, *H1*’de öne sürülen ilk hipotezi destekler nitelikte bulunmuştur.

Çizim tekniklerinin tasarımcıların yaratıcılık/özgünlük becerileri üzerindeki etkilerine yönelik değerlendirmelerine ilişkin öne çıkan sonuçlar sırasıyla aşağıda verilmiştir.

- Öğrencilerin %47,8’i, öğretim üyelerinin %64,3’ü MD tekniğinin “güçlü ve yaratıcı yanları öne çıkardığını” düşünüyor.
- Öğrencilerin %60,9’u, öğretim üyelerinin %61,5’i MD tekniğinin “duyuları harekete geçirdiğini” düşünüyor.
- Öğrencilerin %50’si, öğretim üyelerinin %42,9’u MD tekniğinin “estetik kaygıyı ön plana çıkardığını” düşünüyor.
- Öğrencilerin %65,2’si, öğretim üyelerinin %53,8’i MD tekniğinin “görme ve duyma yanında dokunsallığı öne çıkardığını” düşünüyor.
- Öğrencilerin %56,5’i, öğretim üyelerinin %75’i CAD tekniğinin “salt biçime dayalı, iletişimden yoksun bir fikir ortaya çıkardığını” düşünüyor.
- Öğrencilerin %62’si, öğretim üyelerinin %85,7’si MD+CAD tekniğinin “biçim ve içerik açısından tatmin edici olduğunu” düşünüyor.
- Öğrencilerin %58,7’si, öğretim üyelerinin %85,7’si MD tekniğinin “tasarım fikrinin geliştirilmesinde önemli olduğunu” düşünüyor.
- Öğrencilerin %38’i MD tekniğinin, %40,2’si MD+CAD tekniğinin, öğretim üyelerinin %35,7’si MD tekniğinin, %64,3’ü MD+CAD tekniğinin “özgün bir fikir oluştuğunda, yaratıcı tasarım sürecinin yaşanmasına katkı sağladığını” düşünüyor.
- Öğrencilerin %70,7’si, öğretim üyelerinin ise %38,5’i CAD tekniğinin “imge (görüntü, ses) bombardımanı yaşattığını” düşünüyor.
- Öğrencilerin %50’si, öğretim üyelerinin ise %57,1’i CAD tekniğinin “çok seçenek oluşturduğunu” düşünüyor.
- Öğrencilerin %62’si, öğretim üyelerinin ise %76,9’u CAD tekniğinin “farklı seçeneklerden etkilenilmesi nedeniyle özgünlükten uzaklaşılmasına neden olduğunu” düşünüyor.
- Öğrencilerin %72,8’i, öğretim üyelerinin %57,1’i MD tekniğinin “hızda problem yaşanmasına neden olduğunu” düşünüyor.
- Öğrencilerin %47’8’i, öğretim üyelerinin ise %35,7’si CAD tekniğinin “tasarımda içerik oluşturmayı kolaylaştırdığını” düşünüyor.
- Öğrencilerin %73’9’u, öğretim üyelerinin ise %84,6’sı CAD tekniğinin “hiçbir yaratıcılık ve özgünlük olmadan dijital ortamda var olanı birebir alıp, yeniden üretilmiş gibi sunulmasını sağladığını” düşünüyor.
- Öğrencilerin %48,9’u, öğretim üyelerinin %64,4’ü MD tekniğinin “birey yaratıcı güce sahipse özgün skeç ve fikirler çıkmasına yardımcı olduğunu” düşünüyor.

Bu sonuçlardan; katılımcıların önemli bir kısmının MD tekniğinin “güçlü ve yaratıcı yanları öne çıkardığını”, “duyuları harekete geçirdiğini”, “estetik kaygıyı ön plana çıkardığını”, “görme ve duyma yanında dokunsallığı öne çıkardığını”, “tasarım fikrinin geliştirilmesinde önemli olduğunu” ve “birey

yaratıcı güce sahipse özgün skeç ve fikirler çıkmasına yardımcı olduğunu”, diğer taraftan ise “hızda problem yaşanmasına neden olduğunu” bildirdiği görülmektedir. Diğer taraftan, katılımcıların önemli bir kısmının CAD tekniğinin “salt biçime dayalı, iletişimden yoksun bir fikir ortaya çıkardığını”, “imge (görüntü, ses) bombardımanı yaşattığını”, “çok seçenek oluşturduğunu”, “farklı seçeneklerden etkilenilmesi nedeniyle özgünlükten uzaklaşılmasına neden olduğunu”, “tasarımda içerik oluşturmayı kolaylaştırdığını” ve “yaratıcılık ve özgünlük olmadan var olanın yeniden üretilmiş gibi sunulmasını sağladığını” bildirdiği görülmektedir.

Başka bir sonuçta, manuel çizim (MD), bilgisayar destekli tasarım (CAD) ve manuel + bilgisayar destekli tasarım (MD+CAD) tekniklerinin tasarımcıların bütünleştirme becerileri üzerindeki etkilerine ilişkin veriler analiz edilmiş olup, elde edilen verilerin yüzdelerle değerleri ile Kikare testi sonuçları Tablo 2’de verilmiştir.

**Tablo 2.** Çizim tekniklerinin tasarımcıların bütünleştirme becerileri üzerindeki etkileri

Bağımlı Değişkenler	Öğrenci						Öğretim Üyesi						Kikare Testi Sonuçları		
	MD		CAD		MD+CAD		MD		CAD		MD+CAD		X <sup>2</sup>	df	Sig.
	f	%	f	%	f	%	f	%	f	%	f	%			
<b>B1</b>	79	85,9	6	6,5	7	7,6	18	69,2	2	7,7	6	23,1	5,126	2	0,077**
<b>B2</b>	13	14,1	64	69,6	15	16,3	-	-	18	69,2	8	30,8	5,850	2	0,054*
<b>B3</b>	19	20,7	40	43,5	33	35,9	2	9,1	14	63,6	6	27,3	3,195	2	0,202 <sup>ns</sup>
<b>B4</b>	12	13	59	64,1	21	22,8	4	15,4	20	76,9	2	7,7	2,959	2	0,228 <sup>ns</sup>
<b>B5</b>	48	52,2	16	17,4	28	30,4	4	15,4	-	-	22	84,6	24,791	2	0,000*
<b>B6</b>	15	16,3	39	42,4	38	41,3	-	-	12	46,2	14	53,8	5,029	2	0,081**
<b>B7</b>	16	17,4	64	69,6	12	13	4	15,4	20	76,9	2	7,7	0,692	2	0,708 <sup>ns</sup>

Not: X<sup>2</sup>: Kikare değeri, df: Serbestlik derecesi, \*P< 0,05 düzeyinde önemlidir. ns: P< 0,05 düzeyinde önemsizdir.  
f: Frekans Sayısı, %: Yüzdelerle Değer, MD: Manuel Çizim, CAD: Bilgisayar Destekli Çizim.

Tablo 2’de verilen değerlere göre, çizim tekniklerinin tasarımcıların bütünleştirme becerileri üzerindeki etkilerine yönelik değerlendirmeleri arasında istatistiksel açıdan önemli farklılıklar olduğu açıkça görülmektedir. Öğrenci ve öğretim üyelerinden oluşan katılımcıların değerlendirmeleri arasında istatistiksel açıdan bir farklılık olup olmadığını ANOVA ile test edilmiştir. Buna göre, çizim tekniklerinin katılımcıların tasarım performansını oluşturan bütünleştirme becerileri üzerindeki etkilerini ölçmeye yönelik unsurların değerlendirmelerini kapsayan bağımlı değişkenler arasındaki farklılıklar “B1: Yaratıcı süreçte; kâğıt, kalem, boya ile bütünleşme yaşanıyor”, “B2: Problem karşısında (çizim yeteneği sınırlı ise) hızlı sonuç alma yanılığısı ile dijital ortama bağlı kalarak bütünleşme yaşanıyor”, “B5: Çizim yeteneği varsa, tasarım sürecinde hızlı bütünleştirici sonuç alınıyor” ve “B6: İş ve eğitim ortamında bütünleştirici eylemlerin hızı önem kazanıyor” unsurları için istatistiksel açıdan P<0,05 ve P<0,10 düzeylerinde anlamlı bulunmuştur. Buna göre, katılımcıların değerlendirmeleri arasında dört unsur için farklılıklar olduğu görülmektedir. Tablo 2’de verilen sonuçlar, H<sub>2</sub>’de öne sürülen ikinci hipotezi destekler nitelikte bulunmuştur.

Çizim tekniklerinin tasarımcıların bütünleştirme becerileri üzerindeki etkilerine yönelik değerlendirmelerine ilişkin öne çıkan sonuçlar sırasıyla aşağıda verilmiştir.

- Öğrencilerin %85,9’u, öğretim üyelerinin %69,2’si MD tekniğinin “yaratıcı süreçte; kâğıt, kalem, boya ile bütünleşme yaşanmasını sağladığını” düşünüyor.
- Öğrencilerin %69,6’sı, öğretim üyelerinin %69,2’si CAD tekniğinin “problem karşısında (çizim yeteneği sınırlı ise) hızlı sonuç alma yanılığısı ile dijital ortama bağlı kalarak bütünleşme yaşanmasını sağladığını” düşünüyor.
- Öğrencilerin %43,5’i, öğretim üyelerinin %63,6’sı CAD tekniğinin “birbirinden bağımsız fikirleri bir bütün gibi algılama / algılatmaya neden olduğunu” düşünüyor.
- Öğrencilerin %64,1’i, öğretim üyelerinin %76,9’u CAD tekniğinin “hazır olanın tüketilmesiyle, özgün ve bütünlüğü olmayan tasarımlar oluşturduğunu” düşünüyor.
- Öğrencilerin %52,2’si MD tekniğinin, %84,6’sı MD+CAD tekniğinin “çizim yeteneği varsa, tasarım sürecinde hızlı bütünleştirici sonuçların alınmasını sağladığını” düşünüyor.
- Öğrencilerin %42,4’ü CAD tekniğinin, %41’3’ü MD+CAD tekniğinin, öğretim üyelerinin %46,2’si CAD tekniğinin, %53,8’i MD+CAD tekniğinin “iş ve eğitim ortamında bütünleştirici eylemlerin



hızının önem kazanmasını sağladığını” düşünüyor.

- Öğrencilerin %69,6’sı, öğretim üyelerinin %76,9’u CAD tekniğinin “skeç fikrinden uzaklaşılmasına neden olduğunu” düşünüyor.

Bu sonuçlardan; katılımcıların önemli bir kısmının MD tekniğinin “yaratıcı süreçte; kâğıt, kalem, boya ile bütünleşme yaşanmasını sağladığını” bildirdiği, diğer taraftan ise bilgisayarlı çizim yönteminin “problem karşısında (çizim yeteneği sınırlı ise) hızlı sonuç alma yanlılığı ile dijital ortama bağlı kalarak bütünleşme yaşanmasını sağladığını”, “birbirinden bağımsız fikirleri bir bütün gibi algılama / algılatmaya neden olduğunu”, “hazır olanın tüketilmesiyle, özgün ve bütünlüğü olmayan tasarımlar oluşturduğunu” ve “skeç fikrinden uzaklaşılmasına neden olduğunu” bildirdiği görülmektedir. Ayrıca, katılımcıların yine önemli bir kısmının MD+CAD tekniğinin “çizim yeteneği varsa, tasarım sürecinde hızlı bütünleştirici sonuçların alınmasını sağladığını” ve “iş ve eğitim ortamında bütünleştirici eylemlerin hızının önem kazanmasını sağladığını” bildirdiği görülmektedir.

Diğer bir sonuçta, manuel çizim (MD), bilgisayar destekli tasarım (CAD) ve manuel + bilgisayar destekli tasarım (MD+CAD) tekniklerinin tasarımcıların kavramsallaştırma becerileri üzerindeki etkilerine ilişkin veriler analiz edilmiş olup, elde edilen verilerin yüzdelerle değerleri ile Kikare testi sonuçları Tablo 3’de verilmiştir.

**Tablo 3.** Çizim tekniklerinin tasarımcıların kavramsallaştırma becerileri üzerindeki etkileri

Bağımlı Değişkenler	Öğrenci						Öğretim Üyesi						Kikare Testi Sonuçları		
	MD		CAD		MD+CAD		MD		CAD		MD+CAD		X <sup>2</sup>	df	Sig.
	f	%	f	%	f	%	f	%	f	%	f	%			
<b>K1</b>	25	27,2	30	32,6	<b>37</b>	<b>40,2</b>	6	23,1	8	30,8	<b>12</b>	<b>46,2</b>	0,323	2	0,851 <sup>ns</sup>
<b>K2</b>	29	31,5	<b>35</b>	<b>38</b>	28	30,4	4	15,4	4	15,4	<b>18</b>	<b>69,2</b>	12,863	2	0,002 <sup>*</sup>
<b>K3</b>	38	<b>41,3</b>	27	29,3	27	29,3	8	28,6	<b>18</b>	<b>64,3</b>	2	7,1	12,275	2	0,002 <sup>*</sup>
<b>K4</b>	18	19,6	<b>53</b>	<b>57,6</b>	21	22,8	2	7,1	<b>22</b>	<b>78,6</b>	4	14,3	4,248	2	0,120 <sup>ns</sup>
<b>K5</b>	20	21,7	24	26,1	<b>48</b>	<b>52,2</b>	4	14,3	2	7,1	<b>22</b>	<b>78,6</b>	6,716	2	0,035 <sup>*</sup>
<b>K6</b>	8	8,7	<b>46</b>	<b>50</b>	38	41,3	2	7,1	4	14,3	<b>22</b>	<b>78,6</b>	12,596	2	0,002 <sup>*</sup>

Not: X<sup>2</sup>: Kikare değeri, df: Serbestlik derecesi, \*P<0,05 düzeyinde önemlidir. ns: P<0,05 düzeyinde önemsizdir.

f: Frekans Sayısı, %: Yüzdelerle Değer, MD: Manuel Çizim, CAD: Bilgisayar Destekli Çizim.

Tablo 3’de verilen değerlere göre, çizim tekniklerinin tasarımcıların kavramsallaştırma becerileri üzerindeki etkilerine yönelik değerlendirmeleri arasında istatistiksel açıdan önemli farklılıklar olduğu açıkça görülmektedir. Öğrenci ve öğretim üyelerinden oluşan katılımcıların değerlendirmeleri arasında istatistiksel açıdan bir farklılık olup olmadığını ANOVA ile test edilmiştir. Buna göre, çizim tekniklerinin katılımcıların tasarım performansını oluşturan kavramsallaştırma becerileri üzerindeki etkilerini ölçmeye yönelik unsurların değerlendirmelerini kapsayan bağımlı değişkenler arasındaki farklılıklar “K2: Beş duyuya hitabeden bir imge yaratılabiliyor”, “K3: Problem karşısında kavram geliştirme sürecinde çizim yeteneği, yaratıcı gücü yok ya da sınırlı ise sorunlarla çıkmaza girilebiliyor”, “K5: Yöntem ve problemin çözümü sağlıklı işliyor” ve “K6: Kavramsallaştırma ve tasarım süreci ile birlikte, yazılım programlarının hangisinin kullanılması gerektiği konusunda sağlıklı ve hızlı sonuca ulaşılabilir” unsurları için istatistiksel açıdan P<0,05 düzeyinde anlamlı bulunmuştur. Buna göre, katılımcıların değerlendirmeleri arasında dört unsur için farklılıklar olduğu görülmektedir. Tablo 3’de verilen sonuçlar, H3’de öne sürülen üçüncü hipotezi destekler nitelikte bulunmuştur.

Çizim tekniklerinin tasarımcıların kavramsallaştırma becerileri üzerindeki etkilerine yönelik değerlendirmelerine ilişkin öne çıkan sonuçlar sırasıyla aşağıda verilmiştir.

- Öğrencilerin %40,2’si, öğretim üyelerinin %46,2’si MD+CAD tekniğinin “aşamaları detaylandırma ve kavramsallaştırmada olumlu ilerleme sağladığını” düşünüyor.
- Öğretim üyelerinin %69,2’si MD+CAD tekniğinin “beş duyuya hitabeden bir imge yaratılabilmesini sağladığını” düşünüyor.
- Öğretim üyelerinin %64,3’ü CAD tekniğinin “problem karşısında kavram geliştirme sürecinde çizim yeteneği, yaratıcı gücü yok ya da sınırlı ise sorunlarla çıkmaza girilebildiğini” düşünüyor.
- Öğrencilerin %57,6’sı, öğretim üyelerinin %78,6’sı CAD tekniğinin “süreç sağlıklı yaşanmadığı için kavramsallaştırma konusunun da güdük kaldığını” düşünüyor.

- Öğrencilerin %52,2'si, öğretim üyelerinin %78,6'sı MD+CAD tekniğinin “yöntem ve problemin çözümünde sağlıklı işlediğini” düşünüyor.
- Öğrencilerin %50'si CAD tekniğinin, öğretim üyelerinin %78,6'sı MD+CAD tekniğinin “kavramsallaştırma ve tasarım süreci ile birlikte, yazılım programlarının hangisinin kullanılması gerektiği konusunda sağlıklı ve hızlı sonuca ulaşılabilmesi sağladığını” düşünüyor.

Bu sonuçlardan; katılımcıların önemli bir kısmının MD+CAD tekniğinin “aşamaları detaylandırma ve kavramsallaştırmada olumlu ilerleme sağladığını”, “beş duyuya hitabeden bir imge yaratılabilmesini sağladığını”, “yöntem ve problemin çözümünde sağlıklı işlediğini” ve “kavramsallaştırma ve tasarım süreci ile birlikte, yazılım programlarının hangisinin kullanılması gerektiği konusunda sağlıklı ve hızlı sonuca ulaşılabilmesi sağladığını” bildirdiği, diğer taraftan ise CAD tekniğinin “problem karşısında kavram geliştirme sürecinde çizim yeteneği, yaratıcı gücü yok ya da sınırlı ise sorunlarla çıkmaza girilebildiğini” ve “süreç sağlıklı yaşanmadığı için kavramsallaştırma konusunun da güdük kaldığını” bildirdiği görülmektedir.

Bir başka sonuçta, manuel çizim (MD), bilgisayar destekli tasarım (CAD) ve manuel + bilgisayar destekli tasarım (MD+CAD) tekniklerinin tasarımcıların uygulama becerileri üzerindeki etkilerine ilişkin veriler analiz edilmiş olup, elde edilen verilerin yüzdelik değerleri ile Kikare testi sonuçları Tablo 4’de verilmiştir.

**Tablo 4.** Çizim tekniklerinin tasarımcıların uygulama becerileri üzerindeki etkileri

Bağımlı Değişkenler	Öğrenci						Öğretim Üyesi						Kikare Testi Sonuçları		
	MD		CAD		MD+CAD		MD		CAD		MD+CAD		X <sup>2</sup>	df	Sig.
	f	%	f	%	f	%	f	%	f	%	f	%			
U1	22	23,9	16	17,4	54	58,7	6	21,4	2	7,1	20	71,4	2,124	2	0,346 <sup>ns</sup>
U2	14	15,2	32	34,8	46	50	-	-	14	50	14	50	5,558	2	0,062 <sup>**</sup>
U3	24	26,1	25	27,2	43	46,7	8	28,6	8	28,6	12	42,9	0,136	2	0,934 <sup>ns</sup>
U4	37	40,2	28	30,4	27	29,3	16	57,1	6	21,4	6	21,4	2,496	2	0,287 <sup>ns</sup>
U5	14	15,2	56	60,9	22	23,9	-	-	18	64,3	10	35,7	5,423	2	0,066 <sup>**</sup>
U6	7	7,6	46	50	39	42,4	2	7,1	12	42,9	14	50	0,514	2	0,773 <sup>ns</sup>

Note: X<sup>2</sup>: Kikare değeri, df: Serbestlik derecesi, \*P< 0,05 düzeyinde önemlidir. ns: P< 0,05 düzeyinde önemsizdir.

f: Frekans Sayısı, %: Yüzdelik Değer, MD: Manuel Çizim, CAD: Bilgisayar Destekli Çizim.

Tablo 4’de verilen değerlere göre, çizim tekniklerinin tasarımcıların uygulama becerileri üzerindeki etkilerine yönelik değerlendirmeleri arasında istatistiksel açıdan önemli farklılıklar olduğu açıkça görülmektedir. Öğrenci ve öğretim üyelerinden oluşan katılımcıların değerlendirmeleri arasında istatistiksel açıdan bir farklılık olup olmadığını ANOVA ile test edilmiştir. Buna göre, çizim tekniklerinin katılımcıların tasarım performansını oluşturan uygulama becerileri üzerindeki etkilerini ölçmeye yönelik unsurların değerlendirmelerini kapsayan bağımlı değişkenler arasındaki farklılıklar “U2: Tasarım sürecinin ardından hızla sonuca ulaşmak planlı şekilde işliyor” ve “U5: Ögenin; konumuyla, boyutuyla, rengiyle kolaylıkla oynanabiliyor olması sayesinde aynı ögenin/ingenin çok sayıda türeviyle uygulamalar geliştirmek mümkün oluyor” unsurları için istatistiksel açıdan P<0,10 düzeyinde anlamlı bulunmuştur. Buna göre, katılımcıların değerlendirmeleri arasında kısmen farklılıklar olduğu görülmektedir. Bu sonuç H4’de öne sürülen dördüncü hipotezi desteklememiştir.

Çizim tekniklerinin tasarımcıların uygulama becerileri üzerindeki etkilerine yönelik değerlendirmelerine ilişkin öne çıkan sonuçlar sırasıyla aşağıda verilmiştir.

- Öğrencilerin %58,7'si, öğretim üyelerinin %71,4'ü MD+CAD tekniğinin “tasarım süreci istenildiği şekilde ilerlese sağlıklı bir sonuca gidiliyor şeklinde” düşünüyor.
- Öğrencilerin ve öğretim üyelerinin %50'si MD+CAD tekniğinin “tasarım sürecinin ardından hızla sonuca ulaşmak planlı şekilde işlemlerini sağladığını” düşünüyor.
- Öğrencilerin %46,7'si, öğretim üyelerinin %42,9'u MD+CAD tekniğinin “temel tasarımın çeşitlendirmelerinden olan renk ve doku kavramlarının devreye girmesi sürecinin zenginleştiğini” düşünüyor.
- Öğrencilerin %40,2'si, öğretim üyelerinin %57,1'i MD tekniğinin “problem karşısında çizim yeteneği sınırlı ya da yok ise, uygulama adına ortaya herhangi bir şey konulamamış ise çıkmaza girilmesine neden olduğunu” düşünüyor.

- Öğrencilerin %60,9'u, öğretim üyelerinin %64,3'ü CAD tekniğinin “ögenin; konumuyla, boyutuyla, rengiyle kolaylıkla oynanabiliyor olması sayesinde aynı ögenin/imagenin çok sayıda türeviyle uygulamalar geliştirmenin mümkün olduğunu” düşünüyor.

Bu sonuçlardan; katılımcıların önemli bir kısmının MD+CAD tekniğinin “tasarım süreci istenildiği şekilde ilerlerse sağlıklı bir sonuca gidiliyor şeklinde”, “tasarım sürecinin ardından hızla sonuca ulaşmak planlı şekilde işlemlerini sağladığını” ve “temel tasarımın çeşitlendirmelerinden olan renk ve doku kavramlarının devreye girmesi sürecinin zenginleştiğini” bildirdiği, diğer taraftan ise MD tekniğinin “problem karşısında çizim yeteneği sınırlı ya da yok ise, uygulama adına ortaya herhangi bir şey konulamamış ise çıkmaza girilmesine neden olduğunu” bildirdiği, ayrıca CAD tekniğinin ise “ögenin; konumuyla, boyutuyla, rengiyle kolaylıkla oynanabiliyor olması sayesinde aynı ögenin/imagenin çok sayıda türeviyle uygulamalar geliştirmenin mümkün olduğunu” bildirdiği görülmektedir.

Yukarıda değerlendirilen sonuçlara genel olarak bakıldığında, H5 hipotezinde öne sürülen “tasarım eğitimcileri ve öğrencilerinin tasarımlarında kullanılan çizim tekniklerinin yaratıcılık, bütünleştirme, kavramsallaştırma ve uygulama becerileri üzerindeki etkilerine yönelik değerlendirmeleri arasında anlamlı farklılıklar vardır” görüşünün desteklendiği görülmektedir.

#### 4. SONUÇ VE ÖNERİLER (CONCLUSION AND RECOMMENDATIONS)

Çizim tekniklerinin tasarım eğitimcileri ve öğrencilerinin tasarım performansını oluşturan yaratıcılık/özgünlük, bütünleştirme, kavramsallaştırma ve uygulama becerileri üzerindeki etkilerine yönelik görüşlerinin belirlenmesi amacıyla yapılan bu çalışmaya ilişkin elde edilen sonuçlar ve geliştirilen öneriler aşağıda sistematik bir sıra ile açıklanmıştır.

Katılımcıların önemli bir kısmının manuel çizim (MD) tekniğinin “güçlü ve yaratıcı yanları öne çıkardığını”, “duyuları harekete geçirdiğini”, “estetik kaygıyı ön plana çıkardığını”, “görme ve duyma yanında dokunsallığı öne çıkardığını”, “tasarım fikrinin geliştirilmesinde önemli olduğunu” ve “birey yaratıcı güce sahipse özgün skeç ve fikirler çıkmasına yardımcı olduğunu”, diğer taraftan ise “hızda problem yaşanmasına neden olduğunu” bildirdiği görülmektedir. Diğer taraftan, katılımcıların önemli bir kısmının bilgisayar destekli tasarım (CAD) tekniğinin “salt biçime dayalı, iletişimden yoksun bir fikir ortaya çıkardığını”, “imge (görüntü, ses) bombardımanı yaşattığını”, “çok seçenek oluşturduğunu”, “farklı seçeneklerden etkilenebilmesi nedeniyle özgünlükten uzaklaşılmasına neden olduğunu”, “tasarımda içerik oluşturmayı kolaylaştırdığını” ve “yaratıcılık ve özgünlük olmadan var olanın yeniden üretilmiş gibi sunulmasını sağladığını” bildirdiği görülmektedir. Buna göre, MD çizim tekniği tasarım sürecinde daha yaratıcı, özgün, duyuları harekete geçiren, estetik kaygısı ön planda olan, dokunsallığı öne çıkaran, özgün skeç ve fikir tasarım çözümleri üretmek için etkili olmuştur. Bunun sonucunda, tasarım stüdyosu sürecinde MD tekniğinin, tasarımcıların yaratıcılık/özgünlük becerileri üzerinde oldukça etkili olduğu görülmüştür. Sonuçta, yukarıda ele alınan hususlara göre MD tekniğinin, CAD tekniğine göre daha başarılı olduğu gözlenmiştir.

Yine katılımcıların önemli bir kısmının MD tekniğinin “yaratıcı süreçte; kâğıt, kalem, boya ile bütünleşme yaşanmasını sağladığını” bildirdiği, diğer taraftan ise bilgisayarlı çizim yönteminin “problem karşısında (çizim yeteneği sınırlı ise) hızlı sonuç alma yanılıgısı ile dijital ortama bağlı kalarak bütünleşme yaşanmasını sağladığını”, “birbirinden bağımsız fikirleri bir bütün gibi algılama / algılatmaya neden olduğunu”, “hazır olanın tüketilmesiyle, özgün ve bütünlüğü olmayan tasarımlar oluşturduğunu” ve “skeç fikrinden uzaklaşılmasına neden olduğunu” bildirdiği görülmektedir. Ayrıca, katılımcıların yine önemli bir kısmının MD+CAD tekniğinin “çizim yeteneği varsa, tasarım sürecinde hızlı bütünleştirici sonuçların alınmasını sağladığını” ve “iş ve eğitim ortamında bütünleştirici eylemlerin hızının önem kazanmasını sağladığını” bildirdiği görülmektedir. Buna göre, “çizim tekniklerinin tasarımcıların bütünleştirme becerileri üzerindeki etkileri”nde MD tekniği ile CAD tekniği arasında büyük farklılıkların olduğu görülmüş, sonuçta tasarım stüdyosu sürecinde MD+CAD tekniklerinin tasarımcıların bütünleştirme becerileri üzerindeki etkilerinin oldukça yüksek olduğu ve bu çalışmada MD+CAD tekniklerinin birlikte kullanımının başarıyı artırdığı gözlenmiştir.

Diğer bir sonuçta, katılımcıların önemli bir kısmının MD+CAD tekniğinin “aşamaları detaylandırma ve kavramsallaştırmada olumlu ilerleme sağladığını”, “beş duyuya hitabeden bir imge yaratılabilmesini

sağladığını”, “yöntem ve problemin çözümünde sağlıklı işlediğini” ve “kavramsallaştırma ve tasarım süreci ile birlikte, yazılım programlarının hangisinin kullanılması gerektiği konusunda sağlıklı ve hızlı sonuca ulaşılabilmesi sağladığını” bildirdiği, diğer taraftan ise CAD tekniğinin “problem karşısında kavram geliştirme sürecinde çizim yeteneği, yaratıcı gücü yok ya da sınırlı ise sorunlarla çıkmaza girilebildiğini” ve “süreç sağlıklı yaşanmadığı için kavramsallaştırma konusunun da güdük kaldığını” bildirdiği görülmektedir. Buna göre, “çizim tekniklerinin tasarımcıların kavramsallaştırma becerileri üzerindeki etkileri”nde MD tekniği ile CAD tekniği arasında farklılıkların olduğu görülmüş, sonuçta tasarım stüdyosu sürecinde MD+CAD tekniklerinin tasarımcıların kavramsallaştırma becerileri üzerindeki etkilerinin oldukça yüksek olduğu ve bu çalışmada MD+CAD tekniklerinin birlikte kullanımının başarıyı artırdığı gözlenmiştir.

Bu sonuçlardan; katılımcıların önemli bir kısmının MD+CAD tekniğinin “tasarım süreci istenildiği şekilde ilerlerse sağlıklı bir sonuca gidiliyor şeklinde”, “tasarım sürecinin ardından hızla sonuca ulaşmak planlı şekilde işlenmesini sağladığını” ve “temel tasarımın çeşitlendirmelerinden olan renk ve doku kavramlarının devreye girmesi sürecinin zenginleştiğini” bildirdiği, diğer taraftan ise MD tekniğinin “problem karşısında çizim yeteneği sınırlı ya da yok ise, uygulama adına ortaya herhangi bir şey konulamamış ise çıkmaza girilmesine neden olduğunu” bildirdiği, ayrıca CAD tekniğinin ise “ögenin; konumuyla, boyutuyla, rengiyle kolaylıkla oynanabiliyor olması sayesinde aynı ögenin/imgenin çok sayıda türeviyle uygulamalar geliştirmenin mümkün olduğunu” bildirdiği görülmektedir. Bu noktadan hareketle, “Çizim tekniklerinin tasarımcıların uygulama becerileri üzerindeki etkileri”nde MD tekniği ile CAD tekniği arasında kısmen farklılıkların olduğu görülmüş, sonuçta tasarım stüdyosu sürecinde MD+CAD tekniklerinin tasarımcıların uygulama becerileri üzerindeki etkilerinin oldukça yüksek olduğu ve bu çalışmada MD+CAD tekniklerinin birlikte kullanımında sağlıklı ve başarılı sonuçlara gidilmeyi sağladığı gözlenmiştir.

Sonuç olarak, tasarım stüdyosu sürecinin şekillenmesinde, MD tekniğinin yanında, tasarım sürecinde MD+CAD tekniklerinin birlikte kullanımı, tasarımcıların yaratıcılık, bütünleştirme, kavramsallaştırma ve uygulama becerileri üzerinde daha olumlu ve başarılı sonuçların alınmasını mümkün kılmaktadır. Önemli olan aşamaları detaylandırırken uygulama becerilerinin önemini ortaya çıkararak kavratmaktır. Bu yönüyle, MD+CAD tekniklerinin birlikte kullanımının, uygulama becerilerinin tasarım süreci üzerindeki etkilerinin bilinmesi son derece önem kazanmıştır.

## TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Araştırma anketini doldurarak, verdiği destekten dolayı değerli öğretim üyelerine ve öğrencilere çok teşekkür ederiz.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Onur, D., Zorlu, T. Tasarım Stüdyolarında Uygulanan Eğitim Metotları ve Yaratıcılık İlişkisi, *The Turkish Online Journal of Design, Art and Communication – TOJDAC*, Volume 7 Issue 4, 542,555, (2017).
- [2] Güneş, H., Bıçakçı, S., Orta, E. ve Akdaş, D. Akıllı evlerde kullanılan yapay zekâ teknikleri için simülasyon geliştirilmesi. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 7 (3), 554-563, (2019).
- [3] Cross, N. Natural intelligence in design. *Design Studies*, 20(1), 25-39, (1999).
- [4] Purcell, A.T., Gero. J.S. Drawings and the design process. A review of protocol studies in design and other disciplines and related research in cognitive psychology. *Design Studies*, 19(4), 389-430, (1998).
- [5] Özkan, A., Yıldırım, K. Comparison of Conventional and Computer-aided Drafting Methods from the View of Time and Drafting Quality, *Eurasian Journal of Educational Research*, Issue 62, 239-254, (2016).

- [6] McLaren, S.V. Exploring perceptions and attitudes towards teaching and learning manual technical drawing in a digital age. *International Journal of Technology and Design Education*, 18(2), 167-188, (2008).
- [7] Kashef, A.E. (1993). A comparison of the effectiveness between computer aided drafting and the traditional drafting techniques as methods of teaching pictorial and multiview drawings. Retrieved November 25, 2010, from <http://www.eric.ed.gov/PDFS/ED368935.pdf>.
- [8] Brandon, L., McLain-Kark, J. Effects of hand-drawing and CAD techniques on design development: A comparison of design merit ratings. *Journal of Interior Design*, 27(2), 26-34, (2001).
- [9] Callieri, M., Cignoni, P., Scopigno, R., Gori, G., & Risaliti, M. Beyond manual drafting: A restoration-oriented system. *Journal of Cultural Heritage*, 7(3), 214-226, (2006).
- [10] Senyapili, B., Basa, I. The shifting tides of academe: Oscillation between hand and computer in architectural education. *International Journal of Technology and Design Education*, 16(3), 273-283, (2006).
- [11] Downey, G.L. Human agency in CAD/CAM technology. *Anthropology Today*, 8(5), 2-6, (1992).
- [12] Yıldırım, K. Hidayetoglu, M.L. Ergonomic Effects of Conventional and Computer-Aided Drawing, *Pensee Journal*, Vol. 75, No: 12, pp.122-135, (2013).
- [13] Yıldırım, K., Kasal, O. Çizim mekânlarında insan-eylem-donatı elemanı ilişkileri üzerine bir araştırma [An investigation on the human-action-equipment relationships in drawing spaces]. *Politeknik Dergisi*, 8(3), 289-299, (2005).
- [14] Case, F.D., Matthews, C. Integration of student owned computers into the design curriculum: Policy, issues, and experience. *Journal of Interior Design*, 25(1), 45-56, (1999).
- [15] Bhavnani, S.K., John, B.E. (1996). Exploring the unrealized potential of computer-aided drafting. In: *CHI '96 Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems: Common ground*. 332-339.
- [16] Flemming, U., Bhavnani, S.K., John, B.E. Mismatched metaphor: User vs system model in computer aided drafting. *Design Studies*, 18, 349-368, (1997).
- [17] Magi, R. (2009). Rational drafting. In: *10th International Conference on Engineering Graphics BALTGRAF-10*. Retrieved January 12, 2011, from [http://old.vgtu.lt/leidiniai/leidykla/Balgraf\\_10/PDF/13\\_Magi.pdf](http://old.vgtu.lt/leidiniai/leidykla/Balgraf_10/PDF/13_Magi.pdf)
- [18] Beitz, W., Langner, T., Luczak, H., Müller, T., Springer, J. Evaluation of a compact CAD course in laboratory experiments. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 2(2), 111-135, (1990).
- [19] Majchrzak, A. Effect of CAD on the jobs of drafters and engineers: A quantitative case study. *International Journal of Man-Machine Studies*, 32(3), 245-262, (1990).
- [20] Rafi, A., Samsudin, K.A., Ismail, A. On improving spatial ability through computer-mediated engineering drawing instruction. *Educational Technology & Society*, 9(3), 149-159, (2006).
- [21] Yıldırım, K., Capanoğlu, A., Çağatay, K. The Effects of Physical Environmental Factors on Students' Perceptions in Computer Classrooms, *Indoor and Built Environment*, Volume 20 Issue 5, pp. 501 – 510, (2011).
- [22] Kırcı, N., Yıldırım, K. How the Enthusiasm and Pre-Knowledge of First Year Architectural Students Effects Their Educational Performance, *G.U. Journal of Science*, 26 (4): 619-625, (2013).

- [23] Gökbulut, N., Yıldırım, K. Effects on Students' Perceptual Performance of the Densities of Drawing Table in Design Studios, *Online Journal of Art and Design*, Vol. 6 Iss: 4, 168-182, (2018).
- [24] Yıldırım, K., Hidayetoğlu, M.L., Gökbulut, N., Müezzinoğlu, M.K. Effects on Students' Perceptual Evaluations of the Wall Colors Used in Design Studios by the Virtual Reality Method, *ICONARP International Journal of Architecture and Planning*, Vol. 7, No. 1, 99-120, (2019).
- [25] Cronbach, L.J. "Coefficient alpha and the internal structure of tests", *Psychometrika*, Vol. 16 No. 3, pp. 297-334, (1951).
- [26] Kaplan, R.M., Saccuzzo, D.P. (2009). *Psychological Testing: Principles, Applications, and Issues*, Cengage Learning, Boston, Massachusetts.
- [27] Panayides, P. Coefficient alpha: interpret with caution, *Europe's Journal of Psychology*, Vol. 9 No. 4, pp. 687-696, (2013).

## Design of Luenberg State Observer Based Resolver to Digital Converter in Permanent Magnet Synchronous Motors for Position Accuracy

 Yunis TORUN<sup>1,\*</sup>  Ahmet AKSÖZ<sup>2</sup> 
<sup>1</sup>Sivas Cumhuriyet University, Electrical and Electronics Engineering Department, Merkez/SİVAS

<sup>2</sup>Sivas Cumhuriyet University, Department of Energy Science and Technology, Merkez/SİVAS

### Graphical/Tabular Abstract

#### Article Info:

Research article

Received: 19/07/2019

Revision: 25/12/2019

Accepted: 07/06/2020

#### Highlights

 Luenberger durum  
 gözlemcisi,  
 Pozisyon doğruluğu,  
 RDK,  
 Resolver.

#### Keywords

 Luenberger state observer,  
 Position accuracy,  
 RDC,  
 Resolver.

The Luenberg state observer produces better parameters in steady state. When obtaining higher position accuracy of PMSM, the Luenberg state observer (LSO) based RDC has been compared with the classic RDC under nominal load at the constant reference speed. Firstly, the mathematical model of PMSM and the theoretical control algorithm of two RDC cases have been given. Thus, the position error and the related speed error values can be found for PMSM. Where used resolver has 7.07 V (rms) and a 400Hz. A simulation model has been implemented to achieve absolute position and maximum accuracy or minimum electrical error. Luenberg state observer based RDC and classical RDC performance results have been compared to show whether LSO using is required or not.

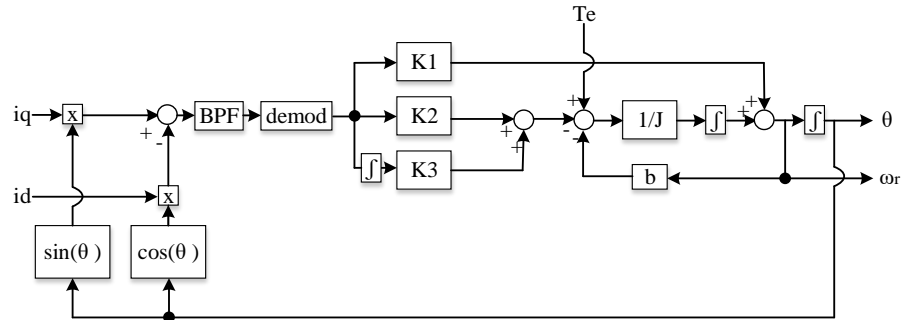


Figure A Luenberg state observer based RDC block diagram

**Purpose:** Resolver sensor is a sensor that provides precise results used in electrical machines, especially for position measurement. Although these sensitive results are sufficient in many applications, it is a need to increase the sensitivity result in high accuracy works such as military applications. This sensitivity requirement can be achieved during the design of the resolver sensor or with an observer-based control system using resolver to digital converter (RDC) data.

**Theory and Methods:** For an observer design, the system model can be used with the resolver sensor input and output information. Because the observer is a mathematical structure and can be used to achieve the desired position results by observing. Luenberg state observer can estimate the state variables associated with control variables, system model and measured output data.

**Results:** Better resolution and electrical precision mean lower error and closer rotor position angle. RDC results with the Luenberg state observer algorithm supply both better resolution and better electrical precision.

**Conclusion:** In this study, the proposed resolver approaches have been verified in the vector-controlled driver system of PMSM. The resolver sensor can be used to obtain absolute position data from a motor shaft. However, the position error should be within the acceptable range According to results of the energy efficiency and the sensor resolution efficiency. The sine and cosine signal received from the resolver sensor is used to calculate position data. For this purpose, classical RDC and the Luenberg state observer based RDC have been studied as a simulation study. As a result of the study, the Luenberg situation observer based RDC approach, which is named as status 2, has been confirmed by the results obtained that it increased the position accuracy for PMSM at constant speed and constant load. When necessary comparisons are made, 49 arcmin and 21 arcmin position accuracy results are obtained respectively. It can be clearly seen that situation 2 has better position accuracy of about 57%.



## Pozisyon Doğruluğu için Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motorlarda Luenberg Durum Gözlemcisi Tabanlı Resolver Dijital Konverter Tasarımı

Yunis TORUN<sup>1,\*</sup> Ahmet AKSÖZ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 58340, Merkez/SİVAS

<sup>2</sup>Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Enerji Bilimi ve Teknolojisi Bölümü, 58340, Merkez/SİVAS

### Öz

Bu çalışmada, geri besleme sinyalleri olarak bir resolver sensörün çıkış sinyalleri kullanılarak bir elektrik motorunun pozisyon kontrolü sunulmuştur. Resolver sensörü, motor rotor açısının konum verisini elde etmek için kullanılır. KMSM (Kalıcı mıknatıslı Senkron Motor)'un enerji verimliliği motor pozisyon hatalarından etkilenir. Çünkü motor pozisyonu hataları enerji kaybına neden olur. Artan pozisyon doğruluğu aynı zamanda enerji verimliliğini de artırır. Resolver sensörü yüksek çözünürlüğe sahiptir, ancak bu doğruluk optimize edilebilir. RDK (resolver dijital konverter) içerisinde bir gözlemci yöntemi kullanılabilir. Özellikle, Luenberg durum gözlemcisi kararlı halde daha iyi parametreler üretir. KMSM'lerde referans hızda nominal yük altında Luenberg durum gözlemcisi tabanlı RDK tasarımı klasik RDK ile karşılaştırılmıştır. İlk olarak, KMSM'un matematiksel modeli kararlı durumda bulunmuştur. Ek olarak, resolver ve RDK teorik olarak açıklanmıştır. Böylece, hata değerleri PMSM için bulunabilir. Ayrıca, RDK içerisinde Luenberg durum gözlemcisi, 7,07 V(rms) ve 400Hz'lik bir resolver için tasarlanmıştır. Mutlak pozisyonu ve maksimum doğruluğu veya minimum elektrik hatasını elde etmek için bir benzetim modeli gerçekleştirilmiştir. Önerilen Luenberg durum gözlemcisi esaslı yöntem modelde uygulanmaktadır. Bu nedenle, Luenberg durum gözlemcisi enerji verimliliğine dayalı RDK performansı, klasik RDC kullanarak tartışılmaktadır.

### Makale Bilgisi

Araştırma makalesi  
Başvuru: 19/07/2019  
Düzeltilme: 25/12/2019  
Kabul: 07/06/2020

### Anahtar Kelimeler

Luenberger durum gözlemcisi,  
Pozisyon doğruluğu,  
RDK,  
Resolver.

### Keywords

Luenberger state observer,  
Position accuracy,  
RDC,  
Resolver.

## Design of Luenberg State Observer Based Resolver to Digital Converter in Permanent Magnet Synchronous Motors for Position Accuracy

### Abstract

In this study, a motor position control is presented using output signals of a resolver sensor as feedback signals. The resolver sensor is used to obtain position data of the rotor angle. Energy efficiency of the permanent magnet synchronous motor (PMSM) is affected by the motor position errors. Because the motor position errors cause energy losses. Increased position accuracy also increases the energy efficiency. The resolver sensor has high resolution, but this accuracy can be optimized. An observer method may be used in resolver to digital converter. Especially, the Luenberg state observer produces better parameters in steady state. The design of Luenberg state observer based RDC in PMSMs under a nominal load at the reference velocity is compared with the classical RDC. Firstly, the mathematical model of the PMSM is established in steady state. In addition, the resolver and the resolver to digital converter (RDC) are theoretically described. Thus, the error values can be found for PMSM. Also, the Luenberg state observer is designed in resolver to digital converter for 7,07 V(rms) and 400Hz resolver sensor. In order to obtain the absolute position and the maximum accuracy or the minimum electrical error, a simulation model is realized. Proposed Luenberg state observer-based method is applied in the model. Because of the fact that, the Luenberg state observer based RDC performance on the energy efficiency has been discussed using the classical RDC.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Resolver sensörü, özellikle otomotiv endüstrisi, askeri uygulamalar ve makine endüstrisi gibi ciddi uygulamalarda kullanılabilir. Resolver, sıcaklık, korozyon, nem ve çarpmalara karşı oldukça dayanıklıdır [1]. Resolverın tercih edilmesi, zorlu endüstriyel ortam gereksinimlerine uyması nedeniyle artmıştır [2].



Resolver dijital konverter (RDK) in dijital dönüşümleri sayesinde resolver sensörden üretilen çıkış sinyalleri pozisyon verisi üretmede kullanılabilir [3]. Uyarım sinyali, sinüs sinyali ve kosinüs sinyali RDK'da pozisyon tespiti yapmak için kullanılmaktadır [4]. Karşılaşılan pozisyon hatasını azaltmak ya da hassas konum doğruluğu elde etmek için çeşitli RDK yöntemleri kullanılarak RDK'nın ölçüm doğruluğu artırılabilir [5].

Genlik dengesizliği ve referans faz kayması, resolver sinyalinin ideal olmayan ve üstesinden gelinmesi gereken özellikleridir [6]. İdeal olmayan özellikleri çözmek için birçok yöntem çalışılmıştır. Parametre gözlemcisi yöntemleri kararlı durum analizi için önemlidir [7]. Özellikle, Luenberger durum gözlemcisi RDK ile kullanılabilir [8]. Bununla birlikte, Luenberger gözlemcisine dayalı parametre gözlemcisi tasarımıyla, genlik dengesizliğinden kaynaklanan tork dalgalanmasının azaltılabileceği söylenebilir [9]. Daha iyi bir pozisyon verisi elde etmek için, kullanılacak gözlemciye bir sistem modeli ve bir sensör modeli tanımlanmalıdır [10].

Genel olarak, bir pozisyon sensörü elektrikli eyleyici pozisyon bilgisi elde etmek için birçok uygulamada;

- Aviyonik sistemlerde,
- Askeri teçhizatlar da,
- Deniz taşımacılığında,
- Karayolu taşımacılığında (kara ve demiryolu, endüstriyel araçlar vb.),
- Rüzgâr türbinlerinde,
- Robotik sistemlerde,
- Çeşitli test platformlarında,
- Teker yapım ekipmanlarında,
- Hareketli güneş panellerinde,
- Medikal ekipmanlarda,
- Tekstil makinelerinde,
- Paketleme makinelerinde kullanılabilir [11]

Bir sistemin durum değişkenlerini gözlemleyen sisteme durum gözlemcisi denir [11]. Bir durum gözlemcisi, sistem girdilerinin, çıktıların ve diferansiyel veya fark denklemlerine dayalı bir sistem modelinin ölçümlerini kullanır. Ölçülemeyen durum değişkenlerini tahmin etmek için birçok gözlemci türü araştırılmıştır. Luenberg gözlemcisi, resolver sensör giriş ve çıkış parametreleri tanımlanarak gerekli ara durumları gözlemlemek için de kullanılabilir [12].

Resolver sensörü elektrik makinalarında özellikle pozisyon ölçümü için kullanılan hassas sonuçlar sağlayan bir sensördür. Bu hassas sonuçlar birçok uygulamada yeterli olsa da askeri uygulamalar gibi yüksek doğruluk gerektiren çalışmalarda hassasiyet sonucunun artırılması bir ihtiyaçtır. Bu resolver sensörün tasarımı sırasında veya resolver to digital converter (RDC) verilerinin kullanılarak gözlemci tabanlı bir kontrol sistemiyle mümkündür. Literatürde Luenberg gözlemcisi tabanlı bir RDC uygulamasına rastlanmamıştır. Bu yüzden bu çalışma uygulamada yenilik konusunda özgünlük taşımaktadır. Enerji verimliliği ve sistem verimi üzerinden sonuçlar ile makale benzerim çalışması sonuçları verilmiştir. Bu çalışmada, Kalıcı mıknatıslı Senkron Motor (KMSM) milinin gerçek konumu ve Resolver sensörünün çıkış sinyalleri vasıtasıyla elde edilen konum arasındaki hatayı azaltmak için iki RDK yaklaşımın karşılaştırılmıştır. Yaklaşım 1, durum 1 olarak tanımlanan klasik RDK yöntemidir. Yaklaşım 2 ise, durum 2 olarak tanımlanan Luenberger durum gözlemcisi tabanlı RDK dır. Clark-park dönüşümü ve uzay vektör modülasyonu ile kontrol blok şeması çıkarılan bir KMSM için her döngüde konum hatası hesaplanabilir. Sistem teorisi ve sistemin matematiksel modeli Bölüm II'de gösterilmektedir. Bu bölümde, PMSM modeli, resolver modeli, hata hesaplaması ve Luenberger durum gözlemcisi anlatılmaktadır. Klasik RDC performansı ve Luenberger durum gözlemcisi tabanlı RDC performansı, Bölüm III'te verilmektedir. Son olarak, bu çalışma Bölüm IV'te özetlenmektedir.

## 2. SİSTEMİN TEORİK İFADESİ VE MATEMATİK MODELİ (THEORITICAL DESCRIPTION OF SYSTEM AND MATHEMATICAL MODEL)

### 2.1. KMSM Modellenmesi (Modelling of the PMSM)

Rotor akı bağlantılarıyla senkronize dönen referans çerçeve modeli içerisinde KMSM'nin matematiksel modeli Eş. 1-8'de ifade edilmektedir. Burada kullanılan parametreler Tablo 1 de verilmiştir.

**Tablo 1.** Sistem değişkenleri ve sabitler

Değişken ve sabitler	Açıklaması
Vd ve Vq	d-q ekseninde stator voltajları
id ve iq	d-q ekseninde stator akımları
$\lambda_d$ ve $\lambda_q$	d-q ekseninde stator akıları
$\Lambda_m$	Kalıcı mıknatıs akı bağlantısı
Te	Elektromanyetik tork
wr	Rotorun açısal hızı
rs	Stator direnci
Ls	Stator öz endüktansı
P	Kutup sayısı
k	Resolver dönüş hızı
U0	Tepe değeri
wref	Uyarma sinyalinin frekansı (rad / sn)
$\Phi$	Rotor pozisyonu (rad)
$\theta$	Ölçülen pozisyon (rad)

Üstelik tasarım için gerekli olan KMSM'nin sayısal parametre değerleri Tablo 2'de verilmiştir. Bu değerleri kullanarak, sistem için bir KMSM modellenmiştir.

**Tablo 2:** KMSM Parametreleri

Stator rezistansı	2,2 $\Omega$
Stator endüktans	0,0029 mH
Kutup sayısı	4
Baz gerilimi	179,629 V
Baz akımı	10 A
Baz akı bağlantısı	1 volt.sec/rad
Baz elektriksel frekans	200 Hz
Baz hız	3000 rpm

Referans motor değerleri, 367 Nm, K<sub>i</sub> 68,7, K<sub>e</sub> 29,4, R 2,2 ohm, L 29 mH +/-%30 (faz-faz) ve J 0,10 Ke-m<sup>2</sup>'dir [13]. KMSM, Alan Yönlendirmeli Kontrol (FOC) dayanan d-q referans çerçevesi modeli ve matematiksel denklemlere göre aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$\begin{bmatrix} v_{sd} \\ v_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R + sL_{sd} & -\omega_r L_{sq} \\ \omega_r L_{sd} & R + sL_{sq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_r \lambda \end{bmatrix} \quad 1$$

$$T_e = \frac{3}{2} P (\lambda i_{sq} + (L_{sd} - L_{sq}) i_{sd} i_{sq}) \quad 21$$

$$\beta = \frac{1}{L_s} \quad 3$$

$$\gamma = \frac{r_s}{L_s} \quad 4$$

Eş 3 ve 4 kullanarak, d-q eksenindeki akımlar ve elektrik torku şu şekilde yeniden yazılabilir;

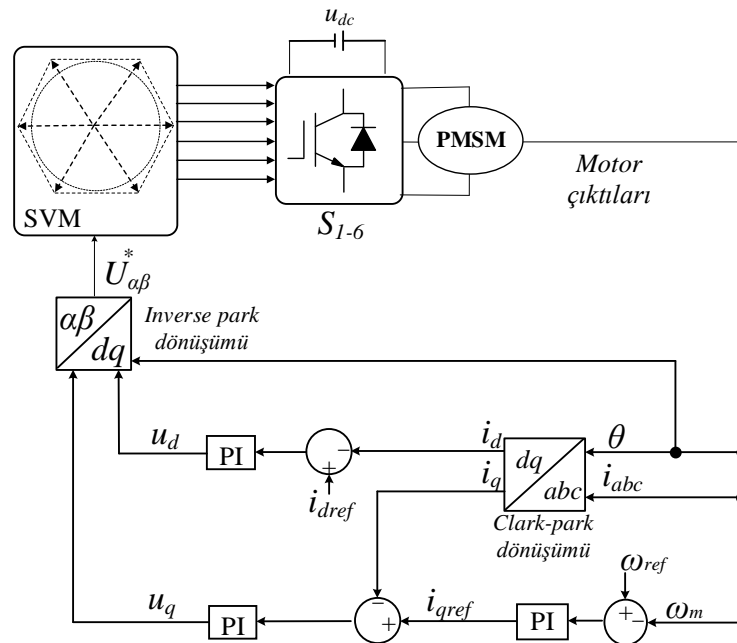
$$\frac{di_d}{dt} = -\gamma i_d + \omega_r i_q + \beta V_d \quad 5$$

$$\frac{di_q}{dt} = -\gamma i_q + \omega_r i_d + \beta \omega_r \lambda_m + p V_q \quad 6$$

$$\lambda_d = \lambda_m \quad 7$$

$$T_e = \left(\frac{3}{2}\right) \left(\frac{P}{2}\right) (\lambda_m i_q) \quad 8$$

Burada Eş. 8'de de görüleceği üzere  $i_d$ , kontrol döngüsünde yaklaşık olarak sıfırdır. Bu eşitlikler kullanılarak KMSM sisteminin kontrol blok diyagramı aşağıda Şekil 1'deki gibi gösterilebilir.

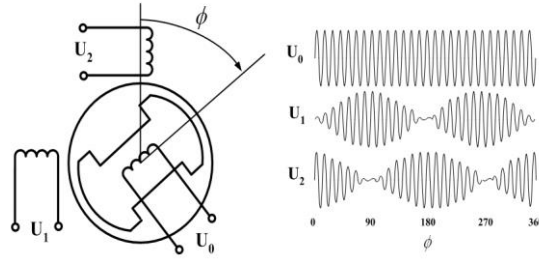


Şekil 1. Vektör kontrollü KMSM blok diyagramı

Bu vektör kontrollü KMSM sistemi, SVM (uzay vektör modülasyonu) ile birlikte bir 6 anahtarlı evirici, KMSM bloğu ve d-q dönüşümünden oluşur. Bu blok diyagramında motor geri bildirimleri motor çıkışları şeklinde akım ve voltaj olarak ölçülür. Bu geri bildirimler, d-q dönüşümünün yapılması için Clark-park dönüşümünde kullanılır. Bu sistem bloğunda  $i_{dref}$  0'dır ve referans hız 3000rpm olarak seçilmiştir. Burada ölçülen veriler geri besleme sinyali olarak kullanıldığından ve her bir döngüde iyileştirilmeye çalışıldığı için çok önemlidir. Bundan dolayı, ölçüm ekipmanı seçimi motor kontrol performansına ve pozisyon hatasına etki eder.

## 2.2 Resolver Sensör Model ve Hata Hesabı (Resolver Sensor Model and Error Calculation)

Resolver ana prensibi bir motorun konumunu ölçmektir. Açısal pozisyonun değişimi üzerinden pozisyon hatası incelenir. Resolver sensör, uyarma sinyaliyle sinüs ve kosinüs çıkış sinyallerinin giriş ve çıkış sinüzoidal sinyalleri olarak uygulandığı bir giriş iki çıkış portlu elektromekanik bir sensör sistemidir. Uyarım sinyali, stator sargısına uygulanan sinüzoidal bir sinyaldir ( $U_0$ ). Bir transformatör gibi stator ve rotor arasındaki elektromanyetik etkileşimi kullanarak sinüs bobini ve kosinüs bobini üzerinden resolver çıkışlarında sinüs ve kosinüs sinyalleri ( $U_1$  ve  $U_2$ ) üretebilir. Resolver elektromanyetik etkileşimin prensibi Şekil 2'de görülebilir.



Şekil 2. Resolver elektromanyetik etkileşim prensibi[12]

Üstelik rotor pozisyonu ( $\Phi$ ) aşağıdaki denklemlerle hesaplanabilir.

$$U_0(t) = \dot{U}_0 \cdot \sin \omega_{ref} t \quad 9$$

$$U_1(\phi, t) = \dot{U}_0 \cdot k \cdot \sin \phi \cdot \sin \omega_{ref} t \quad 102$$

$$U_2(\phi, t) = \dot{U}_0 \cdot k \cdot \cos \phi \cdot \sin \omega_{ref} t \quad 11$$

Denklem 9,10 ve 11 kullanılarak pozisyon hatası aşağıdaki gibi hesaplanabilir,

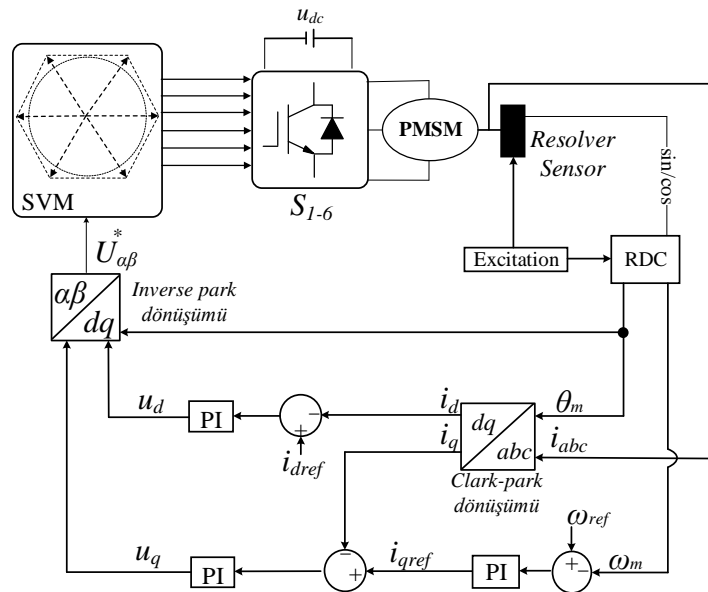
$$err = (\dot{U}_0 \cdot \sin \omega_{ref} t \cdot \cos \theta) (\dot{U}_0 \cdot k \cdot \sin \phi \cdot \sin \omega_{ref} t) - (\dot{U}_0 \cdot \sin \omega_{ref} t \cdot \sin \theta) (\dot{U}_0 \cdot k \cdot \cos \phi \cdot \sin \omega_{ref} t) \quad 12$$

$$err = \dot{U}_0(t) \cdot (\dot{U}_0 \cdot k \cdot \sin \omega_{ref} t) [\sin(\phi - \theta)] \quad 13$$

1 arcsec (") 4,848 137 e-6 radyandır ve arcmin (') 0,290 888 10<sup>-3</sup> radyandır. Bununla birlikte bir dairesel dönüşteki 1" 0,000004848 radyana eşittir. 1" nin 100m radyusta 1mm lik değişimi demektir. Böylece arcsec cinsinden pozisyon doğruluğu Eş.14'teki gibi hesaplanabilir;

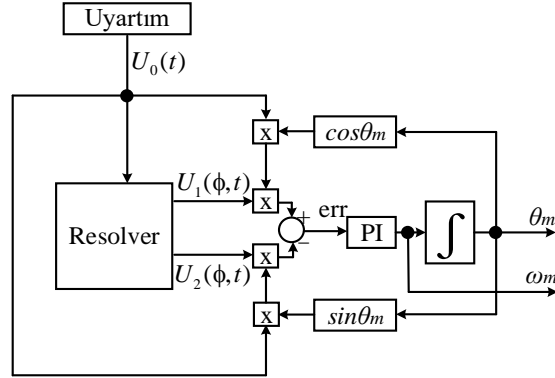
$$accuracy = \frac{err}{0.000004848 \cdot radius} = \frac{\dot{U}_0(t) \cdot (\dot{U}_0 \cdot k \cdot \sin \omega_{ref} t) [\sin(\phi - \theta)]}{0.000004848 \cdot radius} \quad 14$$

Vektör kontrollü KMSM sürücü sisteminin resolver sensör ile birlikte blok diyagramı, Şekil 3'te gösterilmektedir.



Şekil 3. Resolver sensör kullanılan vektör kontrollü KMSM blok diyagramı

Yukarıda resolver sensör içeren blok diyagramı görülmektedir. Burada görülebileceği üzere uyartım bloğu sayesinde sinüs ve kosinüs sinyali üretilir. Üretilen bu sinyaller RDK bloğu içerisinde uyartım sinyali ile karşılaştırılarak pozisyon bilgisi bulunabilir. Eş. 9-13 kullanılarak geliştirilen RDK bloğu Şekil 4'te gösterilmektedir. Bu blok durum 1 olarak daha önce bahsedilen klasik SDK yaklaşımıdır.

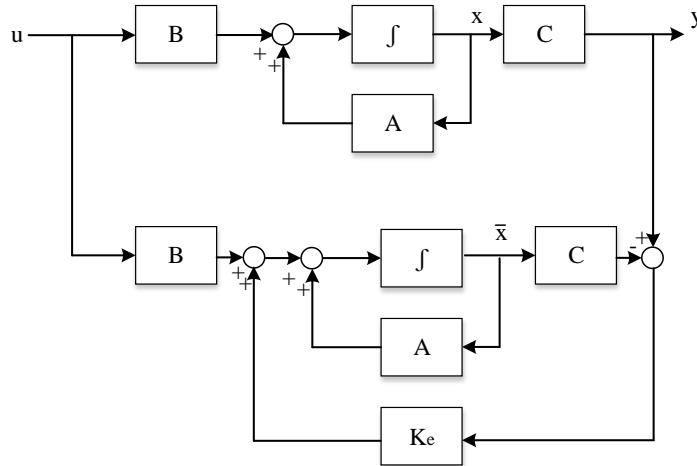


Şekil 4. Klasik RDK yaklaşımı blok diyagramı

Yukarıda görülebileceği üzere  $U_1$  ve  $U_2$  sinyalleri  $U_0$  sinyali ile karşılaştırılarak hata elde edilebilir. Hata çıktısı, PI bloğundan çıktığında  $\omega_m$  hız bilgisi ve bu bilgisinde integrali alındığında  $\theta_m$  pozisyon bilgisi elde edilir. Pozisyon bilgisinin sinüs ve kosinüs değerleri kullanılarak trigonometrik bağlantılar ile hata değeri azaltılabilir. Açısal shaft konum bilgisi olarak ifade edilebilen bu pozisyon bilgisi hız bilgisi vasıtasıyla bulunsa da resolver sensörler daha çok pozisyon kontrolünde kullanılır. Bu çalışmada uyartım voltajı ( $U_0(t)$ ) tepeden tepeye 10 Volt 5 kHz sinüs sinyalidir. Resolver dış çapı 56 mm dir. Dış çap bilgisi trigonometrik hesaplamalarda derece-arcsec dönüşümünde önemlidir.

### 2.3. Luenberger durum gözlemcisi (Luenberger state observer)

Bir gözlemci tasarımı için resolver sensör giriş ve çıkış bilgileri ile sistem modeli kullanılabilir. Çünkü gözlemci matematiksel bir yapıdır ve gözlem yaparak istenen sonuçlar elde etmede kullanılabilir. Luenberg durum gözlemcisi ise kontrol değişkenleri, sistem modeli ve ölçülen çıkış verileriyle ilişkili olan durum değişkenlerini tahmin edebilir. Şekil 5 Luenberg durum gözlemcisi blok diyagramını göstermektedir.



Şekil 5. Luenberg durum gözlemcisi dönüştürme yapısı

Yukarıda A karakteristik matris, B giriş matrisi, C çıkış matrisi ve  $K_e$  gözlemci kazanç matrisidir. Ayrıca u kontrol giriş sinyali, x durum değişkenleri,  $\hat{x}$  gözlemlenen durum değişkenleri ve y çıkış sinyalini ifade eder. Bunlara arasındaki matematiksel eşitlikler ve hata hesabı aşağıdaki gibidir.

$$\dot{\bar{x}} = Ax + Bu \quad 15$$

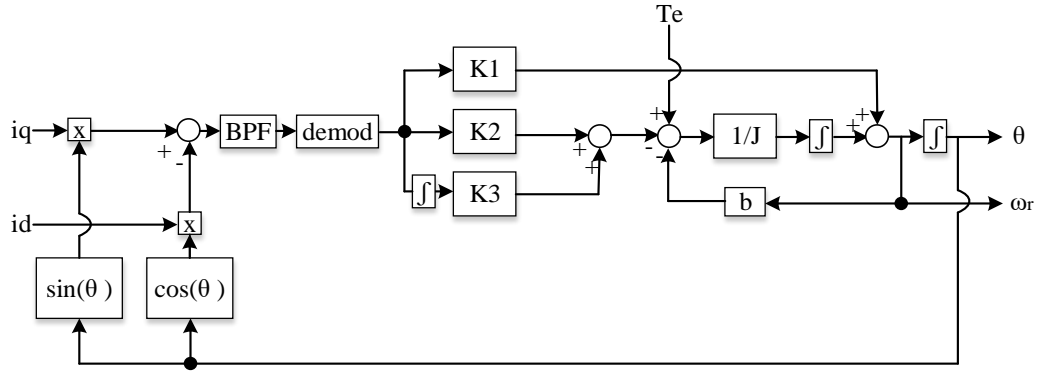
$$y = Cx \quad 16$$

$$\dot{\bar{x}} = A\bar{x} + Bu + K_e(y - C\bar{x}) \quad 17$$

Yukarıdaki denklemler kullanılarak, Luenberger durum gözlemcisi resolver sensör parametreleri için uygulanabilir. Luenberger durum gözlemcisi tabanlı RDK durum 2 yi ifade etmektedir. Luenberg durum gözlemcisi tabanlı RDK için hata hesabı aşağıda gösterilmiştir.

$$\begin{aligned} \dot{x} - \dot{\bar{x}} &= Ax - A\bar{x} + Bu + K_e(Cx - C\bar{x}) \\ &= (A - K_e C)(x - \bar{x}) \end{aligned} \quad 18$$

$e = x - \bar{x}$  değeri ile bulunan hata değeri için gözlemci kazanç matrisi  $K_e$ 'nin  $(A - K_e C)$  özdeğerlere sahip olduğu tasvir edilmiştir. Luenberg durum gözlemcisi tabanlı RDK blok diagramı Şekil 6 da verilmiştir.

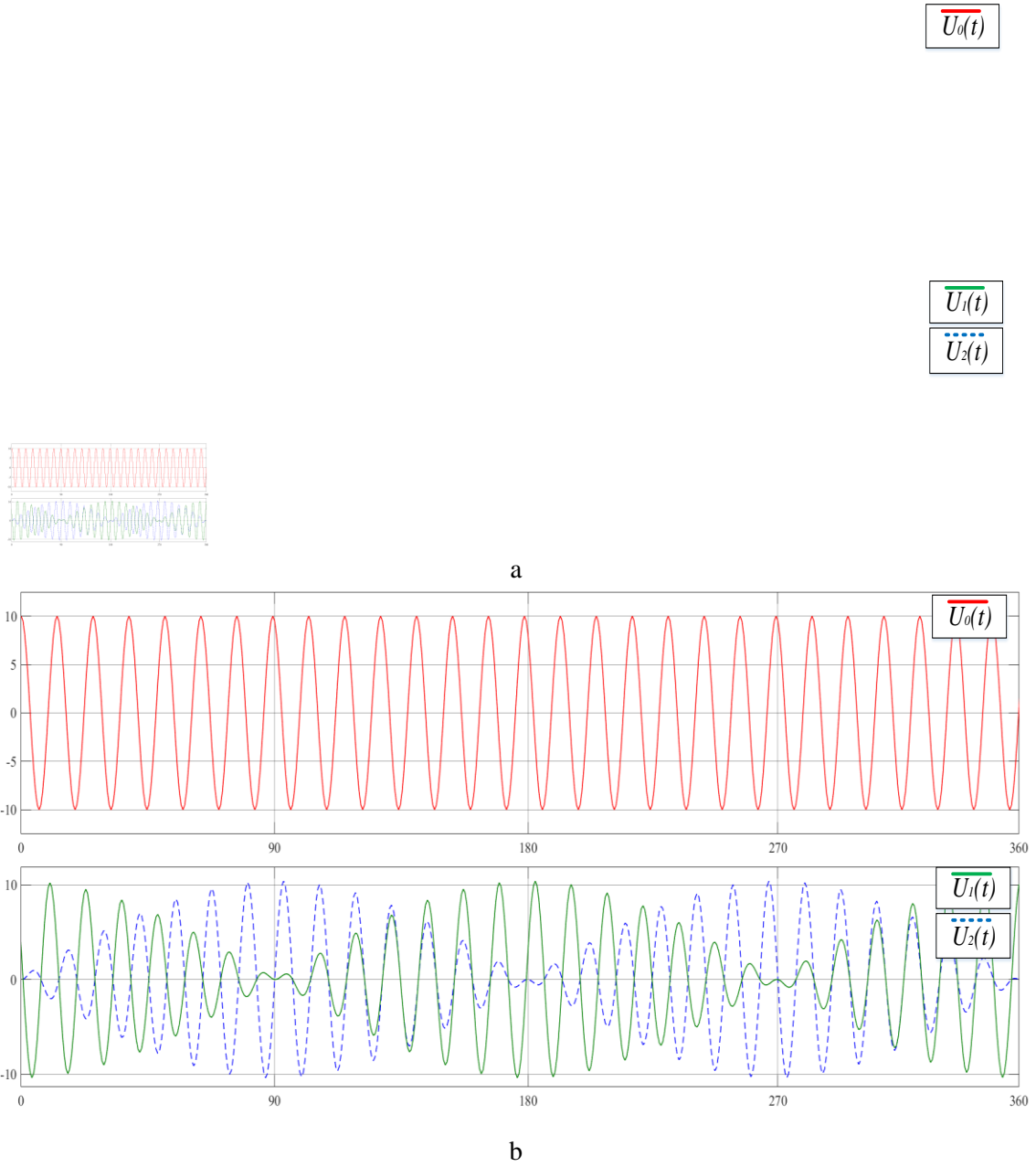


Şekil 6. Luenberg durum gözlemcisi tabanlı RDK blok diyagramı

Durum 2, mevcut durum tahminlerini, tahmin hatası ile orantılı bir miktarda, mevcut çıktı eksi gerçek ölçüm tahminiyle orantılı bir miktarda düzelten bir terim içeren denklemlerle karakterize edilir. Bu düzeltme, gözlemlenen sistem kararsız olsa bile gözlemcinin kararlılığını ve yaklaşmasını sağlar. Bu nedenle, doğruluğu da etkilerler. Çözücü çıktısı ve doğruluk bir sonraki bölümde elde edilmiş ve karşılaştırılmıştır.

### 3. KLASİK RDK VE LUENBERG DURUM GÖZLEMCİSİ TABANLI RDK PERFORMANSLARININ KARŞILAŞTIRILMASI (COMPARISON OF CLASSICAL RDC AND LUENBERGER OBSERVER BASED RDC PERFORMANCES)

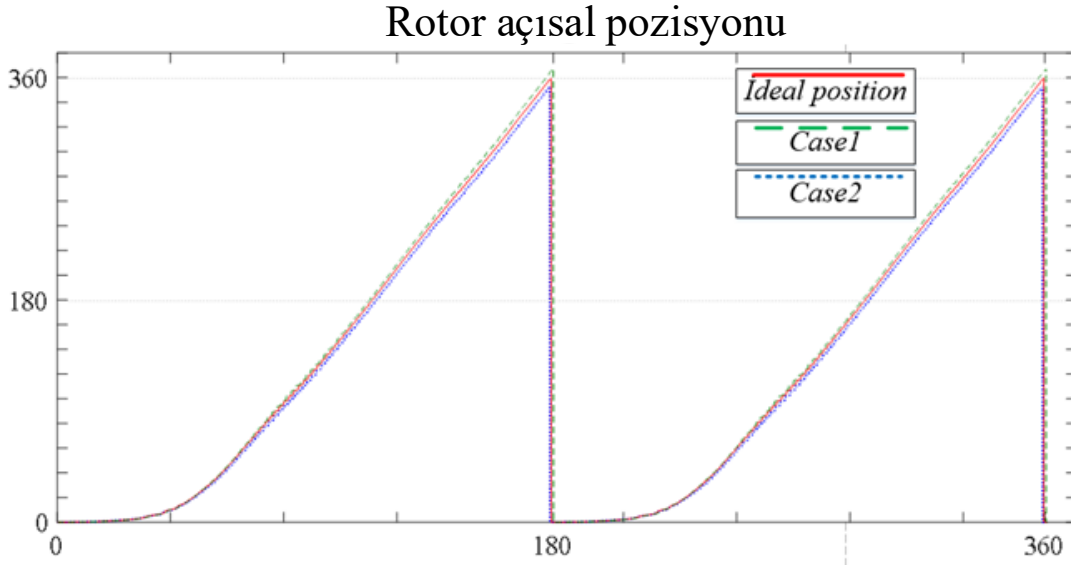
Resolver sensör sistemin performansını anlamak için klasik RDK ve Luenberger durum gözlemcisi tabanlı RDK karşılaştırılır. Şekil 3 ve Şekil 6'daki tasarımlar kullanılarak simülasyon ortamında motor çıktılarına dikkat çekilebilir. Şekil 7'a da klasik RDK kullanıldığında resolver sensör sinyalleri gösterilmektedir. Şekil 7'b de ise Luenberg durum gözlemcisi tabanlı RDK kullanıldığında resolver sensör sinyalleri gösterilmektedir.



**Şekil 7.a.** Klasik RDK pozisyon sinyalleri **b.** LDG tabanlı RDK pozisyon sinyalleri

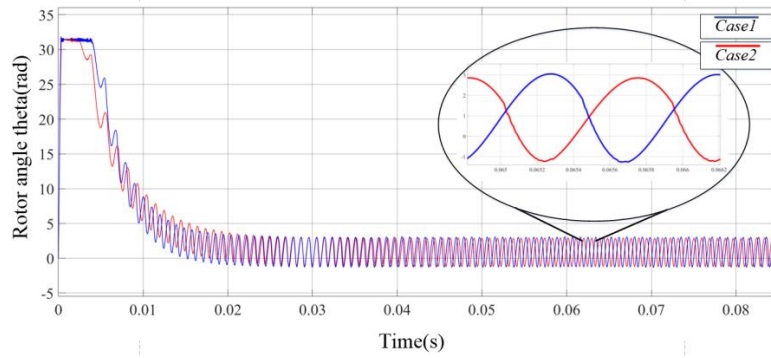
Şekil 7’de, uyarma sinyalini, sinüs sinyalini ve kosinüs sinyalini gösterir. Kırmızı sinyal uyarma sinyalini gösterir ( $U_0(t)$ ), yeşil sinyal sinüs sinyalini ( $U_1(t)$ ) gösterir ve mavi kesikli sinyal kosinüs sinyalini ( $U_2(t)$ ) gösterir. Klasik RDK için hesaplanan hata 0,1832544 derecedir. Luenberger durum gözlemcisi tabanlı RDK için hesaplanan hata ise 0,07330176 derecedir. Bu değerler de sırasıyla 49’ ve 21’ e denk gelir. Bu da Luenberg durum gözlemcisi tabanlı RDK yaklaşımı yani durum 2 tercih edildiğinde %57,143 daha doğru pozisyon bilgisi elde edildiği söylenebilir.

Bununla birlikte, iki durum içinde rotor açısız pozisyon değerleri ve ideal pozisyon bilgisi Şekil 8 de gösterilmiştir. İdeal pozisyon tepkisi her iki durum için de karşılaştırılırsa yine klasik RDK ya göre Luenberg durum gözlemcisi tabanlı RDK yaklaşımının ideal pozisyona daha yakın olduğu aşağıda gösterilmiştir. Bu durum %57,143 lük benzetim pozisyon doğruluğu başarısının diğer bir ispatıdır. Şekil 8’deki rotor açısız pozisyon değerleri rotorun sabit yük ve sabit hızda bir tam dönüşü için çıkarılmıştır.



Şekil 8. Durum 1 ve Durum 2 için ideal pozisyon cevaplarının karşılaştırılması

Şekil 8’de Durum 2’nin durum 1 e göre ideal pozisyona daha yakış seyrettiği görülebilir. Referans sabit ve hız sabit yükte rotor açısı theta nın zamana bağılı değişimi (pozisyon bilgisi) Şekil 9’da görülebilir.



Şekil 9. Her iki durum için referans sabit ve hız sabit yükte rotor açısı theta nın zamana bağılı değişimi

Luenberger durum gözlemcisi tabanlı RDK yaklaşımı kırmızı sürekli çizgi ile gösterilmiştir. Mavi sürekli çizgi ise klasik RDK yaklaşımı sonucudur. Buradan da anlaşılacağı üzere durum 2 için istenene daha yakın rotor açısı ve daha düşük oturma süresi sağlar. Mevcut çalışmanın odağı pozisyon ölçüm doğruluğunun iyileştirilmesi ve sensör çözünürlüğündeki artış için bu sonuçlar sonuç bölümünde özetlenmiştir. Daha iyi çözünürlük ve elektriksel hassasiyet daha düşük hata ve daha yakın rotor pozisyon açısı anlamına gelmektedir.

## 5. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada, önerilen resolver yaklaşımları KMSM'nin vektör kontrollü sürücü sisteminde doğrulanmıştır. Bir motor milinden mutlak konum verisi elde etmek için, resolver sensör kullanılabilir. Resolver sensör motor şaftına monte şekilde çalışan bir elektromanyetik sensördür ve şaft ile birlikte dönen resolver sensör rotoru vasıtasıyla pozisyon ölçümü yapılır. Ancak, günümüz şartlarında gelişen teknoloji enerji verimliliği ve sensör çözünürlük verimi için pozisyon hatası kabul edilebilir aralıkta olmalıdır. Resolver sensörden alınan sinüs ve kosinüs sinyali konum verilerini hesaplamak için kullanılır. Bu amaçla, klasik RDK ve Luenberger durum gözlemcisi tabanlı RDK KMSM üzerinde benzetim ortamında çalışılmıştır. Yapılan çalışmanın sonucunda ise durum 2 olarak isimlendirilen Luenberg durum gözlemcisi tabanlı RDK yaklaşımı sabit hız ve sabit yükte KMSM için pozisyon doğruluğunu artırdığı elde edilen sonuçlar ile doğrulanmıştır. Gerekli karşılaştırmalar yapıldığında 49 arcmin ve 21 arcmin pozisyon doğruluğu sonuçları elde edilmiştir. Açıkça görülmektedir ki durum 2 ile yaklaşık %57'lik daha iyi bir



pozisyon doğruluğu elde edilmiştir. Benzetim sonuçları nominal yükte ve referans hızda gerçekleştirilmiştir. Nominal yükte resolver performansı bu makalede gösterilmeye çalışılan bir sonuçtur. Motorun farklı yüklerde çalıştırılması durumunda ve farklı hızlarda çalıştırılması durumunda deneysel bir çalışma geliştirilmektedir. Burada amaçlanan, motor performansının değil resolver çıktılarının değerlendirilmesidir. Çalışmanın devamında deneysel çalışmalar ile bu elde edilen sonuçların pratik ispatının yapılması ve diğer gözlemci metodlarının uygulanması düşünülmektedir.

### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışma kapsamında Sivas Cumhuriyet Üniversitesi ROBOLAB ekibine teşekkürler.

### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] B. A. Verma and A. Engineer, Design considerations for resolver-to-digital converters in electric vehicles, 2016.
- [2] D. W. Brown et al., Real-Time Fault Detection and Accommodation for COTS Resolver Position Sensors, no. June 2014, 2008.
- [3] C. Mohan, R. Sivappagari, and N. R. Konduru, Sensors & Transducers Review of RDC Soft Computing Techniques for Accurate Measurement of Resolver Rotor Angle, vol. 150, no. 3, pp. 1–11, 2013.
- [4] F. Tootoonchian and Z. Nasiri-gheidari, Twelve-slot two-saliency variable reluctance resolver with non-overlapping signal windings and axial flux excitation, vol. 11, pp. 49–62, 2017.
- [5] L. Xiao, Z. Li, and C. Bi, Optimization of A Reluctance Resolver, 2018 Asia-Pacific Magn. Rec. Conf., no. c, pp. 1–2, 2018.
- [6] A. K. S. Baasch, E. C. Lemos, F. Stein, A. S. Paterno, J. De Oliveira, and A. Nied, Resolver-to-Digital Conversion Implementation—A Filter Approach to PMSM Position Measurement, no. May, 2011.
- [7] X. Ge, Z. Q. Zhu, R. Ren, and J. T. Chen, A Novel Variable Reluctance Resolver with Nonoverlapping Tooth-Coil Windings, vol. 30, no. 2, pp. 784–794, 2015.
- [8] F. Tootoonchian, Effect of damper winding on accuracy of and mixed-eccentricities, pp. 845–851, 2018.
- [9] I. Resolvers, Modeling and Simulation of Analog Angular Sensors for Manufacturing Purposes.
- [10] S. Hwang, Y. Kwon, J. Kim, and J. Oh, Compensation of Position Error due to Amplitude Imbalance in Resolver Signals, vol. 9, no. 5, pp. 748–756, 2009.
- [11] M. Bourogaoui, H. Ben Attia, and I. S. Belkhdja, Speed / position sensor fault tolerant control in adjustable speed drives – A review Sales in 2007 Proximity Sales in 2011 Rotary Growth rate, ISA Trans., vol. 64, pp. 269–284, 2016.
- [12] W. Kaewjinda and M. Konghirun, Vector Control Drive of Permanent Magnet Synchronous Motor Using Vector Control Drive of Permanent Magnet Synchronous Motor Using Resolver Sensor, International Journal of Computer Science Engineering (IJCSE), Vol 2 No 4, December, 2016.
- [13] A. Aksöz, A. Saygın, "Aynı Fiziksel ve Elektromanyetik Parametreler Altında EAKMSM ve ORKMSM'un Vuruntu Torkuna göre Karşılaştırılması". Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji 6 (2018): 659-667

# Estimating Electric Energy Consumption in Turkey Using Artificial Neural Networks Optimized with Jaya Algorithm

 Ergun UZLU\*  Tayfun DEDE 

Karadeniz Technical University, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, 61080, Ortahisar/ TRABZON

## Graphical/Tabular Abstract

### Article Info:

Research article

Received: 05/02/2020

Revision: 01/06/2020

Accepted: 03/07/2020

### Highlights

- Jaya Algorithm.
- ANN Training.
- Energy Forecasting.

### Keywords

 Jaya Algorithm  
 Electric Energy  
 Consumption/Demand  
 Artificial Neural Networks  
 Turkey

In this study, Turkey's electric energy consumption was predicted by using artificial neural networks with Jaya algorithm. As shown in Fig. A, three-layer ANN model encompassing GDP, population, and import-export values as entry parameters was formed with electric energy consumption as the exit parameter. Jaya algorithm was employed for network training.

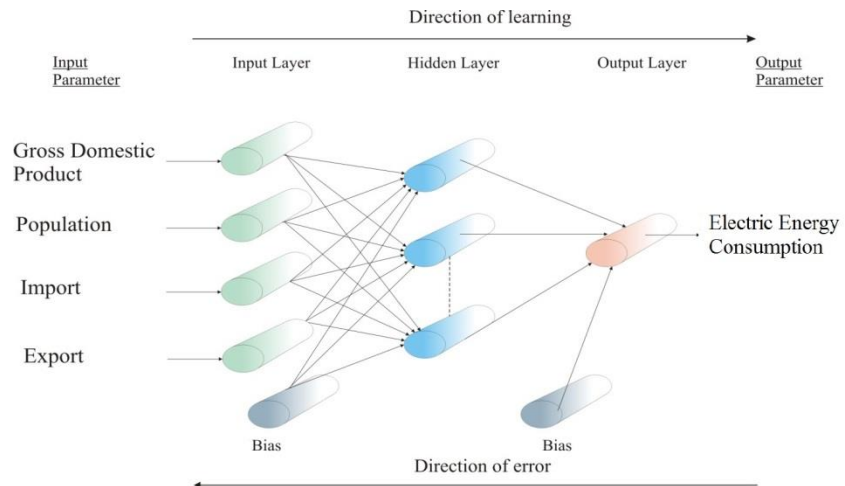


Figure A. Proposed ANN model for electric energy consumption

**Purpose:** The main objective of the present study was to apply ANN (artificial neural network) model with the Jaya algorithm to estimate electric energy consumption (EEC) in Turkey.

**Theory and Methods:** The model estimates EEC based on gross domestic product (GDP), population, import, and export data. Data from 1980 to 2008 were used to develop the model and data from 2009 to 2014 were used to evaluate the model's predictive ability. ANN-Jaya model's performance was compared with the performance of artificial bee colony (ABC) and teaching learning based optimization (TLBO) algorithm-trained ANN models. After defining the best model according to various error criteria, EEC values for Turkey were predicted under two different scenarios.

**Results:** Simulation results show that, ANN-Jaya modeling performed better results than ANN-TLBO or ANN-ABC modeling. According to the root mean square error values obtained for the test set, the proposed ANN-Jaya model performed 58.9% and 43.9% better than the ANN-ABC and ANN-TLBO models, respectively.

**Conclusion:** In this study, the EEC in Turkey between 1980 and 2023 was modeled based on GDP, population, import, and export indicators under two different scenarios. The two scenarios showed that the future EEC of Turkey would vary between 311.5 and 333.6 TWh in 2023.



## Jaya Algoritması ile Optimize Edilmiş Yapay Sinir Ağlarını Kullanarak Türkiye’de Elektrik Enerjisi Tüketiminin Tahmini

Ergun UZLU\*<sup>ID</sup> Tayfun DEDE<sup>ID</sup>

Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 61080, Ortahisar/Trabzon

### Öz

Bu çalışmanın temel amacı, Türkiye'nin gelecekteki elektrik enerjisi tüketimini (EET) tahmin etmek için Jaya algoritması kullanılarak eğitilmiş bir yapay sinir ağı (YSA) modeli oluşturmaktır. Gayri safi yurtiçi hasıla (GSYİH), nüfus, ithalat ve ihracat verileri modelde bağımsız değişkenler olarak kullanılarak önerilen yöntem irdelenmiştir. Önerilen yöntemin doğruluğunu göstermek için YSA-Jaya diğer iki yüksek performanslı optimizasyon yöntemi olan yapay arı kolonisi (YAK) ve öğretme öğrenme tabanlı optimizasyon (ÖÖTO) algoritmaları eğitilmiş YSA modelleri ile karşılaştırılmıştır. YSA-Jaya modeli, test veri setinde YSA-YAK ve YSA-ÖÖTO modellerinden daha küçük hata değerlerine yakınsamıştır. Bu nedenle, YSA-Jaya algoritması kullanılarak Türkiye'nin EET projeksiyonu iki farklı senaryoya göre 2023 yılına kadar yapılmıştır. Sonuçlar TEİAŞ (Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi) tarafından yapılan projeksiyonlar ve literatürdeki diğer ilgili çalışmalarla karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, EET'nin YSA-Jaya kullanılarak doğru bir şekilde modellenebileceğini ve bu optimizasyon yönteminin gelecekteki elektrik tüketimini tahmin etmek için avantajlı olduğunu göstermektedir.

### Makale Bilgisi

Araştırma makalesi  
Başvuru: 05/02/2020  
Düzeltilme: 01/06/2020  
Kabul: 03/07/2020

### Anahtar Kelimeler

Jaya Algoritması  
Elektrik Enerjisi  
Tüketimi/Talebi  
Yapay Sinir Ağları  
Türkiye

### Keywords

Jaya Algorithm  
Electric Energy  
Consumption/Demand  
Artificial Neural Networks  
Turkey

### Estimating electric energy consumption in Turkey using artificial neural networks optimized with Jaya algorithm

#### Abstract

This study's primary objective was to use a Jaya algorithm to train an artificial neural network (ANN) model such that it can estimate Turkey's future electric energy consumption (EEC). Employing gross domestic product (GDP), population, import, and export data as independent variables, the proposed method was examined. In order to show accuracy of proposed method, ANN-Jaya was compared with ANN models trained with two other high-performing optimization methods, namely the artificial bee colony (ABC) method and the teaching-learning-based optimization (TLBO) method. The ANN-Jaya model converges to a lower error on the test dataset than the ANN-ABC and ANN-TLBO models. Thus, using the ANN-Jaya model, Turkey's EEC was projected out to 2023 under two different scenarios. The results were compared with projections by TEİAŞ (Turkish Electricity Transmission Corporation) and other related studies in the literature. The results show that EEC can be accurately modeled using ANN-Jaya, and that this optimization method is advantageous for predicting future electricity consumption.

## 1.GİRİŞ (INTRODUCTION)

Elektrik enerjisi tüketimi (EET) gelişmekte olan ülkelerde hızla artmaktadır. Örneğin, Türkiye’de EET değeri 1990 yılında 56.81 TWh iken bu değer 2014’te 257.22 TWh olarak gerçekleşmiştir [1]. Türkiye’nin güçlü ekonomik büyümesi, genç nüfusu ve hızlı kentleşmesi nedeniyle EET’nin önümüzdeki yıllarda artmaya devam etmesi beklenmektedir. Türkiye’de resmi EET tahminleri Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi (TEİAŞ) tarafından yapılmaktadır. Resmi tahminler genellikle gerçek değerlerden oldukça yüksek çıkmaktadır ve güvenilir olarak kabul edilmemektedir. Gelecekteki elektrik enerjisi gereksinimlerini karşılamak ve planlamak için Türkiye hükümetinin gerçekçi EET tahminlerine ihtiyacı vardır. Ek olarak, EET’nin kısa vadeli doğru tahminleri, kesintisiz ve bol miktarda elektrik enerjisi sağlanmasında anahtar rol oynamaktadır. Yanlış tahminler elektrik enerjisi temininde aksaklıklara yada

enerji israfına yol açabilmektedir. Bu nedenle doğru EET tahmini hayati öneme sahiptir. EET, nüfus, ekonomik büyüme, enerji tesisleri ve iklim gibi çok çeşitli faktörlerden etkilenmektedir. Bu durum EET'nin kesin tahminini çok zorlaştırmaktadır [2, 3].

Bu çalışmanın temel amacı, Jaya algoritması ile eğitilmiş bir yapay sinir ağı (YSA) temelinde, Türkiye'de EET tahmini için yeni ve gerçekçi bir model sunmaktır. Model dört farklı giriş verisi (GSYİH (gayri safi yurt içi hasıla), nüfus, ithalat ve ihracat verileri) ve bir çıkış verisinden (EET) oluşmaktadır. Geliştirilen YSA-Jaya modeli kullanılarak, gelecekteki EET değerleri iki ayrı senaryo için tahmin edilmiştir.

## 2.LİTERATÜR TARAMASI (LITERATURE REVIEW)

EET tahmin yöntemleri zaman serileri analizi, regresyon analizi ve yapay zeka yöntemleri olarak üç ana başlık altında sınıflandırılabilir. Bütünlenen otoregresif hareketli ortalama (ARIMA) yöntemi ve gri tahmin modeli en çok kullanılan zaman serileri analizlerindedir. Yapay zeka yöntemleri içerisinde ise YSA ve meta-sezgisel algoritmalar (yapay arı kolonisi (YAK), öğretme öğrenme tabanlı optimizasyon (ÖÖTO), karınca kolonisi optimizasyonu (ACO), parçacık sürüsü optimizasyonu (PSO), genetik algoritma (GA) ve bulanık mantık) ön plana çıkmaktadır.

EET tahmininde yer alan problemlerle başa çıkmak için, dünyanın farklı ülkelerinde yukarıda bahsedilen yöntemler kullanılarak birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Ding vd. [2] ve Xu vd. [4] Çin'in elektrik tüketimini tahmin etmek için gri tahmin modelini kullanmışlardır. Kasule ve Ayan [5] Uganda'da EET tahmini için PSO ve YAK algoritmalarından oluşan melez bir model geliştirmişlerdir. Kaboli vd. [6] ve Askarzadeh [7] İran'daki EET'yi tahmin etmek için sırasıyla yapay kooperatif arama ve PSO algoritmalarını kullanmışlardır. An vd. [8] tarafından Avustralya'daki elektrik talebinin yarım saatlik bir ölçekte tahmin etme potansiyeli araştırılmıştır. Pal ve Kar [9] hisse senedi fiyatlarını tahmin etmek için bulanık mantık yöntemi ile kaba küme teorisinden oluşan melez bir model geliştirmişlerdir. Önerdikleri model mevcut modeller ile karşılaştırarak daha iyi sonuç verdiğini tespit etmişlerdir. Das vd. [10] bulanık mantık yöntemi için bir korelasyon katsayısı ve bu korelasyon katsayısını uygulamak için bir algoritma önermişlerdir. Geliştirdikleri yöntemi gerçek hayatta uygulanabilir iki örnek üzerinde test ederek başarılı sonuçlar elde etmişlerdir. Bu çalışmalar incelendiğinde zaman serileri analizi tekniklerinin [2, 4] ve meta-sezgisel algoritmaların [5-10] EET tahmininde yaygın bir şekilde kullanıldığı ve başarılı sonuçlar verdiği görülmüştür. Dünyada EET tahmininde yaygın olarak kullanılan bir diğer teknik ise YSA'dır. Pao [11] Taiwan'daki, Wang vd. [12] ve Gonzalez vd. [13] ise Çin'deki EET'yi tahmin etmek için YSA'yı kullanmışlardır. Geliştirdikleri YSA modellerini ARIMA yöntemiyle karşılaştırmışlardır. YSA modellerinin ARIMA modellerinden daha iyi sonuç verdiğini tespit etmişlerdir. Son zamanlarda metasezgisel algoritmalar YSA eğitiminde sıklıkla kullanılmaktadır. Ardakani ve Ardehali [14], İran ve ABD'deki EET'yi tahmin etmek için bir melez YSA-PSO tekniği geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri modelden elde ettikleri sonuçları regresyon analizinden elde ettikleri sonuçlarla karşılaştırmışlardır. YSA-PSO tekniğinin regresyon analizinden daha iyi sonuç verdiğini tespit etmişlerdir. Pal ve Kar [15] yapay sinir ağlarının ağırlıklarını bulanık mantık yöntemini kullanarak optimize etmişlerdir. Geliştirdikleri modeli Mackey-Glass zaman serisi yöntemi ile karşılaştırmışlardır. Önerdikleri yöntemin daha iyi sonuç verdiğini tespit etmişlerdir.

Dünya'nın farklı bölgelerinde olduğu gibi, Türkiye'de de EET'yi tahmin etmek için birçok farklı teknik kullanılmıştır. Hamzacebi ve Kutay [16], Hamzacebi [17], Kavaklıoğlu vd. [18], Bilgili vd. [19], Oğcu vd. [20], Gürbüz vd. [21], Kaytez vd. [22], Birim ve Tümtürk [23], Günay [24] ve Kankal ve Uzlu [25] YSA'yı, Öztürk vd. [26] GA'yı, Yumurtacı ve Asmaz [27] ve Tunc vd. [28] regresyon analizini, Akay ve Atak [29] gri yuvarlanma tahmin modelini, Hamzaçebi ve Es [30] optimize edilmiş gri modeli, Erdoğan [31] ve Sumer vd. [32] ARIMA modelini, Dilaver ve Hunt [33] yapısal zaman analizi tekniğini, Toksari [34] ACO algoritmasını, Küçükali ve Barış [35] bulanık mantık tekniğini, Demirel vd. [36] uyarlanabilir ağ tabanlı bulanık mantık ve ARIMA'yı, Kavaklıoğlu [37] destek vektör regresyonunu, ve Kiran vd. [38] YAK ve PSO yöntemlerini kullanarak Türkiye'nin EET'sini tahmin etmişlerdir. Türkiye'de regresyon analizi [27, 28] ve zaman serileri analizi [29-33] gibi istatistiksel yöntemler EET modellenmesi alanında sıklıkla kullanılmaktadır. Ancak bu tür yöntemler bazı kesin matematiksel ifadelerle dayandığından EET ve EET'yi etkileyen bağımsız değişkenlerdeki dalgalanmalara yeterince uyum sağlayamamaktadır. Bu nedenle bu tür yöntemlerin EET tahmininde tatmin edici performans elde etmesi güçleşmektedir. Bu

eksikliği giderme noktasında kesin matematiksel ifadelerle dayanmayan ve doğrusal olmayan modelleme yeteneği yüksek olan YSA ve meta-sezgisel algoritmalar gibi yapay zeka yöntemleri ön plana çıkmaktadır. Önceki çalışmalar [21, 26, 38, 39] incelendiğinde, istatistiksel yöntemlerden biri olan regresyon tekniğindeki bu eksikliği gidermek için regresyon fonksiyonlarının GA, YAK, PSO ve ÖÖTO gibi algoritmalarla optimize edilmeye çalışıldığı görülmektedir. Buna ek olarak, YSA ve meta-sezgisel algoritmaların bu tür istatistiksel yöntemlerden daha iyi sonuç verdiği önceki çalışmalarda [11-16, 19, 40] belirtilmiştir. Ayrıca YSA tekniğinin, zaman serileri ve regresyon analizine göre çok daha az sayıda veri kullanarak daha başarılı sonuçlar elde etmektedir [16]. EET tahmini için YSA [16-20, 23] kullanılan çalışmalarda ise, ağ eğitiminde geleneksel geri yayımlı (GY) algoritma kullanılmıştır. GY algoritmasının yerel minimuma takılma, ezberleme gibi problemler nedeniyle YSA eğitiminde yetersiz kalmaktadır [25]. Bu sorunların üstesinden gelebilmek için GY yerine YAK ve ÖÖTO gibi algoritmalar kullanılmaktadır [25, 41, 42]. Yapılan bu değerlendirmelerden Türkiye’de EET tüketiminin tahmini ile ilgili modellerin hala geliştirilmesi gerektirir.

Burada önerilen Jaya tekniği, hem basit hem de sağlam yeni bir meta-sezgisel algoritmayı içerir. Jaya, sınırlandırılmış veya sınırlandırılmamış optimizasyon problemlerini çözmek için kullanılabilir. Jaya algoritması nispeten yeni olmasına rağmen, mekanik [43], elektrik [44], termal [45] ve inşaat mühendisliği [46] gibi çeşitli mühendislik alanlarında uygulanmıştır. Ayrıca önceki çalışmalar [47-49] incelendiğinde, Jaya’nın PSO, YAK, ÖÖTO gibi gelişmiş optimizasyon tekniklerinden daha iyi bir performans gösterdiği tespit edilmiştir. Ek olarak, Jaya algoritması sadece iki kontrol parametresine (maksimum iterasyon sayısı ve popülasyon büyüklüğü) sahiptir, bu onu diğer meta-sezgisel algoritmalara göre avantajlı kılmaktadır [49].

Bu çalışmada, Türkiye’de EET’yi tahmin etmek için melez bir YSA-Jaya modeli geliştirilmiştir. Modelde GSYİH, nüfus, ithalat ve ihracat verileri giriş, EET ise çıkış verisi olarak kullanılmıştır. YSA’nın mimarisi ve kullanılacak transfer fonksiyonları deneme yanılma yöntemiyle ve daha önceki çalışmalar dikkate alınarak belirlenmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda üç katmanlı, tek ara katmana sahip ve ara katmanından 5 nöron bulunduran ağ yapısının en uygun olduğu tespit edilmiştir. Transfer fonksiyonu olarak giriş katmanı ile ara katman arasında tanjant sigmoid fonksiyonu, ara katman ile çıkış katmanı arasında ise doğrusal fonksiyon kullanılmıştır. Modelin ağırlıkları ise Jaya algoritması kullanılarak optimize edilmiştir. Literatür taramasına göre, daha önce yayınlanmış hiçbir çalışmada, YSA-Jaya’nın EET’yi modelleme ve tahmin etme kabiliyeti test edilmemiştir. Bu nedenle, çalışma hem Türkiye’de EET’ye özgü pratik bir uygulama hem de genel olarak enerji sektörü için yenidir.

### 3. YÖNTEM (METHODOLOGY)

#### 3.1. Yapay Sinir Ağı Modeli (Artificial Neural Network (ANN) Model)

Bir ara katmana sahip olan YSA modelleri önceki çalışmalarda [25, 41, 42] çok iyi sonuçlar vermiştir. Ayrıca tek ara katman kullanılması durumunda optimize edilecek YSA ağırlıklarının sayısı azalmakta bu da YSA eğitimini kolaylaştırmaktadır. Bu nedenle, EET’yi tahmin etmek için bir giriş, bir çıkış ve bir ara katmandan oluşan çok katmanlı ileri beslemeli bir sinir ağı kullanılmıştır. Ara katmandaki nöron sayısını belirlemek için kesin bir yöntem bulunmadığı için nöron sayısı deneme yanılma yöntemi ile belirlenmektedir [50]. Önceki çalışmalara göre [25, 40] ara katmanda 5, 10, 15 ve 20 nöron kullanımının iyi sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Bu nedenle, bu çalışmada, ara katmanın 5, 10, 15 veya 20 nöron içerdiği YSA mimarileri test edilmiştir. Ağda, transfer fonksiyonu olarak tanjant sigmoid fonksiyonu (giriş katmanı → ara katman) ve doğrusal (ara katman → çıkış katmanı) fonksiyon kullanılmıştır. YSA eğitimi için YAK, ÖÖTO ve Jaya algoritmaları kullanılmıştır.

YSA modellerinde amaç fonksiyonu olarak denklemi aşağıda verilen ortalama karesel hata (OKH) kullanılmıştır [51]. YSA eğitimi süresince YAK, ÖÖTO ve Jaya algoritmaları en küçük OKH değerini verecek YSA ağırlıklarını bulmaya çalışırlar.

$$OKH = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (y_k - o_k)^2 \quad 1$$

Denklem 1’de  $o_k$  YSA’nın tahmin ettiği değer,  $y_k$  gerçek değer, ve  $n$  ise toplam veri sayıdır.

### 3.2. Yapay Arı Kolonisi Algoritması (Artificial Bee Colony (ABC) Algorithm)

YAK algoritması önceki çalışmalarda [42, 52, 53] detaylı bir şekilde açıklanmıştır. Bu nedenle, tekrara düşmemek için, bu bölüm sadece YAK algoritmasının ana kavramlarını kapsayacaktır. 2005 yılında Karaboğa tarafından tanıtılan YAK algoritması, bal arılarının yiyecek arama davranışlarından esinlenilerek geliştirilmiştir [52]. YAK algoritmasında, her bir çözüm bir gıda kaynağına karşılık gelir ve arılar çözüm uzayındaki en kaliteli (nektar miktarı en yüksek) gıda kaynaklarının yerini bulmaya çalışır. Arı sürüsü işçi arı, gözlemci arı ve kaşif arılardan oluşur [54]. Gözlemci ve işçi arıların sayısı birbirine eşittir. Yani işçi arıların sayısı gıda kaynaklarının sayısına eşittir. Bu çalışmada YSA modelinin ağırlıkları çözüm uzayındaki gıda kaynaklarına karşılık gelir, yani YAK algoritması YSA için en uygun ağırlıkları arar. YAK algoritmasının performansı kullanılan arı sayısı (popülasyonun büyüklüğü), limit değeri ve maksimum döngü sayısından oluşan kontrol parametrelerine bağlıdır. İlk gıda kaynağı yerleri yani çözümler algoritma tarafından rastgele seçilir ve algoritma çözümleri değerlendirir. İstenen yakınsama değerine yada maksimum döngü sayısına ulaşıncaya kadar aşağıdaki adımlar tekrarlanır:

- (1) İşçi arılar, rastgele seçilen gıda kaynaklarının yakınında yeni gıda kaynakları ararlar.
- (2) İşçi arılar daha sonra gıda kaynaklarının kalitesi ve kaynak konumları hakkındaki bilgileri gözlemci arılarla paylaşır.
- (3) Bir gözlemci arı, işçi arılar tarafından sağlanan bilgilere dayanarak performansı en yüksek olan besin kaynağını seçer.
- (4) Arılar, şu ana kadar elde edilen en yüksek performanslı gıda kaynaklarını hafızaya alırlar.
- (5) Önceden belirlenen limit değeri dahilinde bir gıda kaynağının kalitesini artırmak mümkün olmadığında, işçi arı onu terk eder ve bir kaşif arı rolünü üstlenir.
- (6) Kaşif arılar potansiyel olarak daha zengin besin kaynaklarını rastgele bir şekilde keşfetmek için dışarı çıkarlar.

### 3.3. Öğretme Öğrenme Tabanlı Optimizasyon (ÖÖTO) Algoritması (Teaching–Learning-Based Optimization (TLBO) Algorithm)

Rao vd. [55] tarafından geliştirilen ÖÖTO algoritması öğretmenlerin ve öğrencilerin öğretme ve öğrenme süreçlerinden esinlenilerek geliştirilmiş popülasyon tabanlı bir algoritmadır. Bu tekniğin temelini, bir popülasyonda öğretmen olarak adlandırılan en bilgili bir birey ve bu öğretmenin bilgisinden yararlanarak kendisini geliştiren öğrenci olarak adlandırılan bireyler oluşturmaktadır. Popülasyon içerisindeki bireyler birbiri ile etkileşime girerek kendilerini geliştirir ve sorunu çözmek için ideal bireyi (global çözüm) elde etmeye çalışırlar.

Algoritma öğretme ve öğrenme aşamalarından oluşur. Öğretme aşamasında amaç fonksiyonun değerine göre popülasyon içerisindeki en bilgili kişi öğretmen olarak seçilir. Bu aşamada popülasyon içerisindeki tüm öğrenciler öğretmenle etkileşime girer ve güncellenir. Güncellenen her bir öğrenci için amaç fonksiyonu değeri yeniden hesaplanır. Bu etkileşimin ardından amaç fonksiyonunun değeri iyileşirse güncel öğrenci eski öğrenci ile değiştirilir aksi takdirde eski öğrenci korunur. Öğretme aşamasının amacı, öğrencilerin bilgisinin öğretmenin bilgisine göre geliştirilmesidir [25, 56].

Öğrenme aşamasında ise, birinci aşamada öğretmenden etkilenerek oluşturulan öğrenci bireyler birbiri ile kıyaslanarak iyi olana göre tekrar kendilerini yenilerler. Son yinelemenin ardından bir öğrenci en iyi çözüm olarak seçilir [57]. Öğrenme aşamasının sonunda ÖÖTO için bir döngü (iterasyon) tamamlanmış olur. Öğretme ve öğrenme aşamaları amaç fonksiyonu istenilen değere ulaşıncaya veya maksimum iterasyon sayısına ulaşıncaya kadar devam eder. Popülasyon içerisindeki öğretme-öğrenme etkileşimi aşağıdaki denklemler kullanılarak gerçekleştirilir.

$$\text{öğrenci}_i = [X_{i,1} \ X_{i,2} \ \dots \ X_{i,D_n}], \quad i = 1, 2, \dots, P_n \quad 2$$

$$\text{ortalama} = [\text{ortalama}(X_1) \ \text{ortalama}(X_2) \ \dots \ \text{ortalama}(X_{D_n})] \quad 3$$

$$\text{öğrenci}_{\text{yeni}_i} = \text{öğrenci}_i + r * (\text{öğretmen} - \text{ÖF} * \text{ortalama})$$

4

Yukarıda  $P_n$  popülasyonun büyüklüğü (birey sayısı),  $D_N$  optimize edilecek parametre sayısı,  $r$  [0, 1] arasında değişen rastgele bir sayı,  $\text{ÖF}$  (1 ya da 2 alınabilir) öğretim faktörüdür. Bu çalışmada  $X_i$  yapay sinir ağlarının optimize edilecek ağırlıklarıdır.

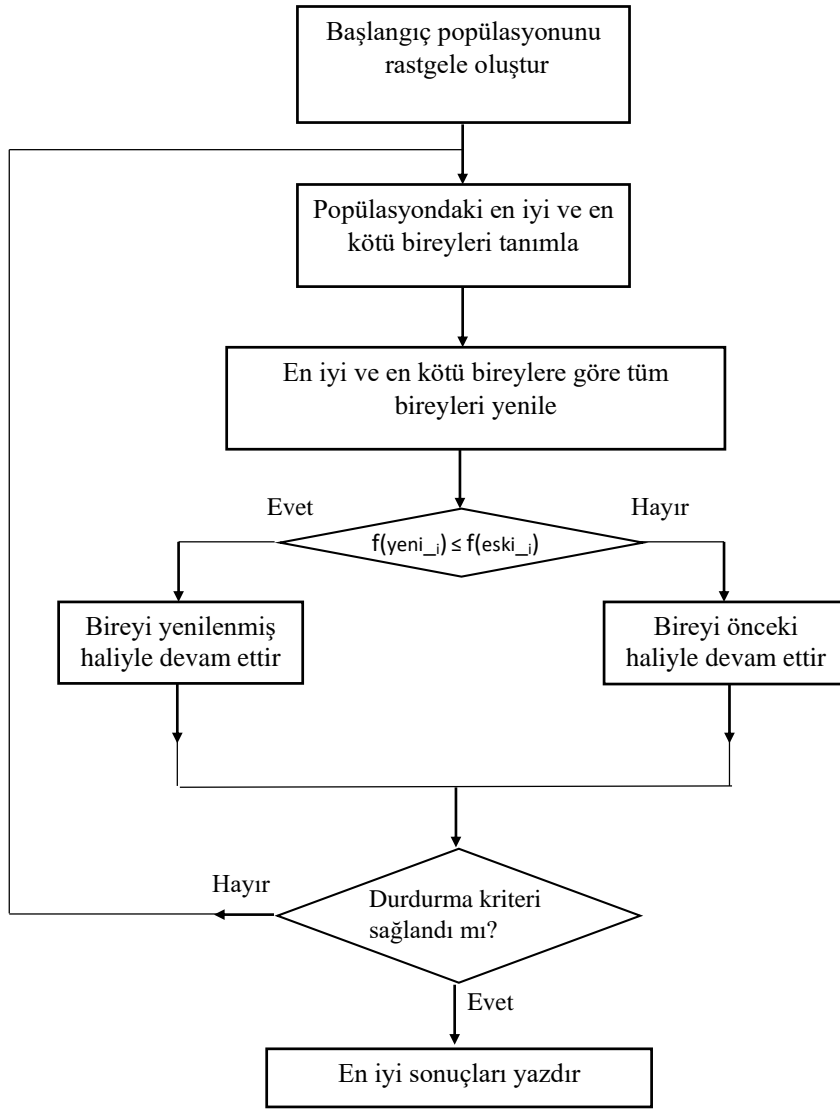
ÖÖTO algoritması diğer popülasyon tabanlı algoritmalar gibi özel kontrol parametreleri içermez. ÖÖTO algoritmasının kontrol parametreleri popülasyonun büyüklüğü ve maksimum iterasyon sayısıdır. Bu iki kontrol parametresi tüm popülasyon tabanlı algoritmalarda bulunmaktadır. Bu nedenle ÖÖTO algoritmasının bir optimizasyon problemine uygulanması çok basittir. Bu özelliğinden dolayı ÖÖTO algoritması son yıllarda birçok araştırmacı tarafından tercih edilmektedir. ÖÖTO algoritması ve uygulanması ile ilgili daha fazla detay önceki çalışmalarda [41, 55, 58] bulunabilir.

### 3.4. Jaya Algoritması (Jaya Algorithm)

Popülasyon büyüklüğü ve maksimum iterasyon sayısı tüm popülasyon tabanlı optimizasyon algoritmalarının ortak kontrol parametreleridir. Bu ortak kontrol parametrelerinin yanı sıra, farklı algoritmalar kendi özel kontrol parametrelerini de gerektirmektedirler. Örneğin, GA, bir optimizasyon probleminin çözümünde mutasyon oranı, çaprazlama oranı ve seçim operatörü gibi özel kontrol parametreleri gerektirir. Benzer şekilde YAK algoritması, gözlemci arı, işçi arı, kaşif arı gibi kendi özel kontrol parametrelerini kullanmaktadır. Ayrıca PSO, arı kolonisi algoritması, uyum arama, emperyalist rekabet ve diferansiyel evrim gibi algoritmalarda kendi özel kontrol parametrelerini içermektedirler [59]. Kontrol parametrelerinin doğru seçimi oldukça zor olmakla birlikte algoritmanın performansına doğrudan etki etmektedir. Kontrol parametrelerinin sayısı arttıkça optimizasyon süreci uzamakta ve güçleşmektedir. Bu nedenle ÖÖTO ve Jaya gibi sadece ortak kontrol parametrelerini içeren algoritmalar özel kontrol parametreleri içeren diğer algoritmalarla göre daha avantajlıdır.

Araştırmacı Rao R.V. [60] tarafından geliştirilen ve JAYA olarak adlandırılan optimizasyon algoritması, yukarıda sözü edilen kontrol parametrelerinin kullanımını en aza indirgeyerek oluşturulan bir yapay zeka algoritmasıdır. JAYA algoritmasında kontrol parametresi olarak popülasyon büyüklüğü ( $P_n$ ) ve en büyük yineleme sayısı kullanılır. JAYA, araştırmacı Rao R.V. tarafından daha önce geliştirilmiş algoritma olan ÖÖTO'daki gibi öğretim ve öğrenme aşamaları yerine sadece bir popülasyondaki en iyi ve en kötü bireylerin etkileşiminden yeni bireyler oluşturmak üzerine kurulmuştur. Yani ÖÖTO'nun aksine Jaya tek bir aşamadan oluşur ve basit bir nümerik yapıya sahiptir [60]. Bu nedenle Jaya'yı uygulamak ve kodlamak çok basittir. Ayrıca Jaya basit yapısı nedeniyle daha hızlı çalışarak sonuçta daha kısa sürede ulaşır. Tüm bu özellikler Jaya'yı ÖÖTO, YAK ve diğer popülasyon tabanlı algoritmalarla göre üstün kılmaktadır.

Algoritmasının akış diyagramı Şekil 1'de verilmektedir. Şekil 1'de  $f(\text{yeni}_i)$  i. yeni bireyin amaç fonksiyonu değeri,  $f(\text{eski}_i)$  ise i. eski bireyin amaç fonksiyonu değeridir. JAYA kelimesi, Sanskritçe dilinde zafer anlamına gelmektedir. Algoritmanın amacı, popülasyondaki bireylerin en başarılı bireye yaklaşması ve en kötü bireyden uzaklaşmasıdır [61].



Şekil 1. JAYA algoritmasının akış diyagramı [61]

Algoritmanın akış diyagramından görüleceği üzere yine bir rastgele başlangıç popülasyonu oluşturulur. Popülasyonda, problemin amaç fonksiyonu kullanılarak en iyi ve en kötü bireyler belirlenir. En iyi bireye yaklaşmak ve en kötü bireyden uzaklaşmak düşüncesiyle yapılan etkileşim ile bireyler yenilenir. Yenilenen her bir birey kendisinin yenilenmeden önceki haline ait amaç fonksiyonu değeri dikkate alınarak, bir sonraki yinelemede eski ya da yeni haliyle popülasyonda kalacağına karar verilir. Bu düşünce ile bütün bireyler yenilenerek probleme ait durdurma kriteri sağlanıncaya kadar yinelemeler sürdürülür. Çözümler (bireyler) aşağıdaki denkleme göre güncellenir:

$$X'_{j,k,i} = X_{j,k,i} + r_{1,j,i} (X_{j,en\ iyi,i} - |X_{j,k,i}|) - r_{2,j,i} (X_{j,en\ kötü,i} - |X_{j,k,i}|) \quad 5$$

Bu denklemde  $X_{j,k,i}$  i. iterasyonda k. çözüm için j. tasarım değişkenini,  $X_{j,en\ iyi,i}$  en iyi çözümün j. tasarım değişkenini ve  $X_{j,en\ kötü,i}$  ise en kötü çözümün j. tasarım değişkenini temsil etmektedir.  $X'_{j,k,i}$  değeri  $X_{j,k,i}$ 'nin bu algoritmaya göre değiştirilmiş hali ve  $r_{1,j,i}$  ve  $r_{2,j,i}$  ise i. iterasyon boyunca j. tasarım değişkeni için [0-1] aralığında oluşturulan rasgele iki değerdir [62].



Yeni önerilen çözümün amaç fonksiyonu (hata) değeri mevcut çözümün amaç fonksiyonunun değerinden daha az ise, yeni çözüm varsayılan mevcut çözümün yerine geçer. Aksi takdirde, algoritma mevcut çözümü korur. Bu döngü, yakınsama gereksinimleri karşılanana kadar tekrar edilir. Jaya algoritması hakkında ayrıntılı bilgi literatürde bulunabilir [47, 59, 62].

### 3.5. YAK, ÖÖTO ve Jaya Algoritmaları ile YSA Eğitimi (ANN Training with ABC, TLBO and Jaya Algorithm)

Geleneksel olarak, YSA'lar GY algoritması ile eğitilirler [43]. Bununla birlikte, YAK ve ÖÖTO algoritmalarının yapay sinir ağlarının eğitimindeki performansının GY algoritmasından daha iyi olduğu önceki çalışmalarda belirtilmiştir [25, 41, 42, 63]. Bu nedenle, bu çalışma YSA'yı eğitmek için GY algoritması kullanmamıştır. Bunun yerine, YSA'nın ağırlıkları, amaç fonksiyonun değeri kabul edilebilir bir değere düşene kadar YAK, ÖÖTO veya Jaya algoritmaları tarafından optimize edilmeye çalışılmıştır. Minimize edilmesi amaçlanan fonksiyon her durumda MSE'dir (1).

Eğitilen YSA modellerinin performansını değerlendirmek için ortalama rölatif hata (RH) [64], ortalama karesel hatanın karekökü (OKHK) [42], ortalama mutlak hata (OMH) [25], korelasyon katsayısı (R) [65] ve U-istatistik [66] değerleri kullanılmıştır. Bu ölçüm değerleri, tahmin edilen enerji tüketim değerleri ( $y_k$ ) ile gerçek enerji tüketim değerleri ( $o_k$ ) arasındaki uzaklığı tanımlar. RH, OKHK ve OMH değerleri küçüldükçe model daha gerçekçi tahminler yapmaktadır. Ayrıca, R değeri 1'e, U-istatistik değeri ise 0'a yaklaştıkça modelin performansı artmaktadır. Denklem 9 'da  $\bar{y}_k$  EET değerlerinin ortalamasını,  $\bar{o}_k$  ise gerçek EET değerlerinin ortalamasını göstermektedir. Ortalama RH, OKHK, OMH, R ve U-istatistik aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$\text{ortalama RH} = \frac{\sum_{i=1}^n \left( \frac{y_k - o_k}{y_k} \right)}{n} \times 100 \quad 6$$

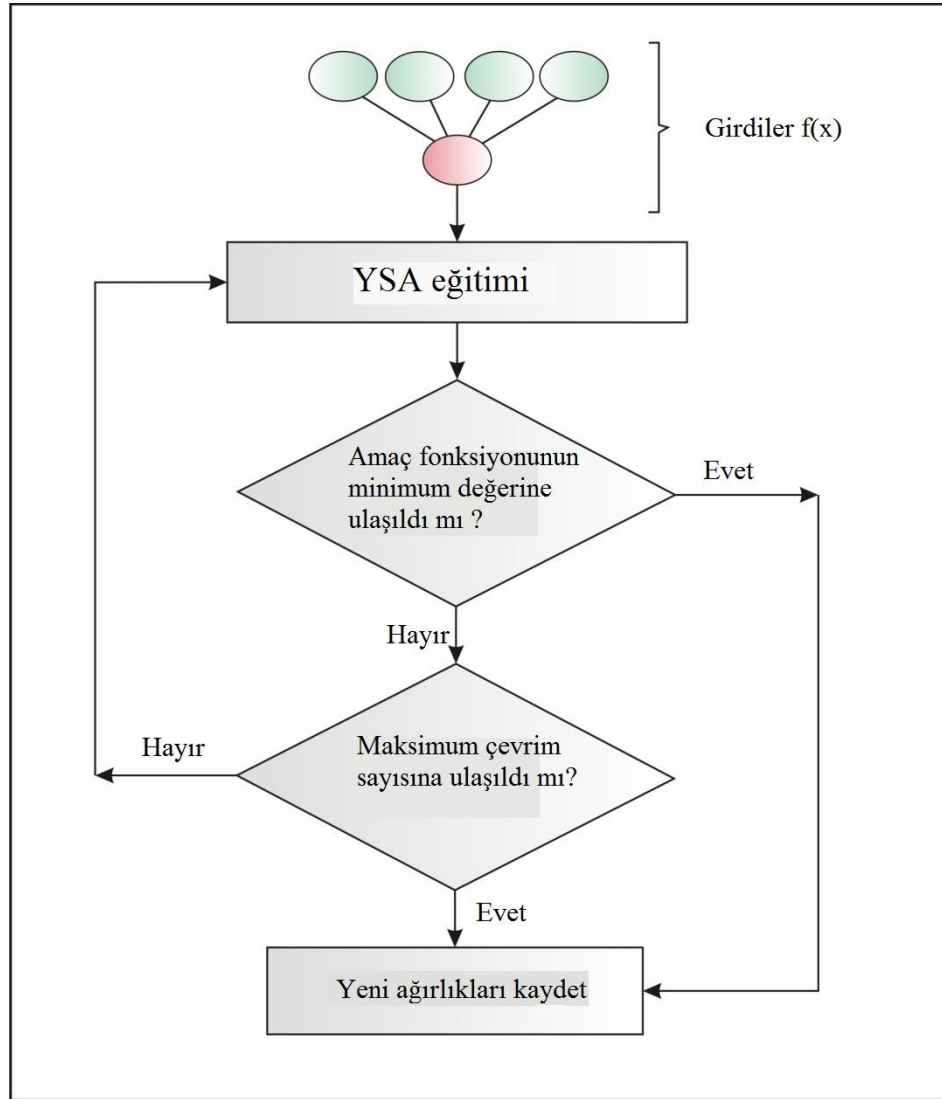
$$\text{OKHK} = \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_k - o_k)^2 \right]^{1/2} \quad 7$$

$$\text{OMH} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |(y_k - o_k)| \quad 8$$

$$R = \frac{\left( \sum_{i=1}^n (o_k - \bar{o}_k)(y_k - \bar{y}_k) \right)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (o_k - \bar{o}_k)^2 \sum_{i=1}^n (y_k - \bar{y}_k)^2}} \quad 9$$

$$U = \frac{\text{OKHK}}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (o_k)^2 + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_k)^2}} \quad 10$$

YSA modellerinin eğitiminde maksimum iterasyon sayısı 5000 olarak seçilmiştir. YAK, ÖÖTO ve Jaya algoritmaları için popülasyon büyüklüğü 50 olarak belirlenmiştir. Popülasyon büyüklüğü sabit olup modelleme çalışmaları sırasında hep aynı değer kullanılmıştır. YAK algoritmasında limit değeri ve işçi arı sayısı sırasıyla 100 ve 25 olarak belirlenmiştir. YSA ağırlıkları için çözüm aralığı [-1, 1] olarak seçilmiştir. Amaç fonksiyonu (OMH) için hedef değer  $8 \times 10^{-8}$ 'dir. Eğitim süreci maksimum iterasyon sayısına ulaşıncaya veya amaç fonksiyonu istenilen değere indirgenene kadar devam eder. YSA eğitiminin akış şeması Şekil 2'de sunulmuştur.



**Şekil 2.** YSA için önerilen eğitim şeması [63]

### 3.6. Veri Seti (Data Set)

Bu çalışmada, Türkiye'nin EET'sini tahmin etmek için GSYİH, nüfus ve ithalat ve ihracat verileri bağımsız değişkenler olarak kullanılmıştır. Bu dört değişken literatürde EET'yi tahmin etmek için sıkça kullanılmıştır [14, 25, 26, 34, 38]. 1980–2008 dönemine ait tarihsel veriler ağız eğitimi için, 2009–2014 dönemine ait veriler ise eğitilmiş ağız performansını değerlendirmek için ayrılmıştır. Her bir bağımsız değişken için farklı kaynaklardan toplanan veriler Tablo 1'de sunulmaktadır.

**Tablo 1.** EET ve bağımsız değişken değerleri [1, 67, 68, 69]

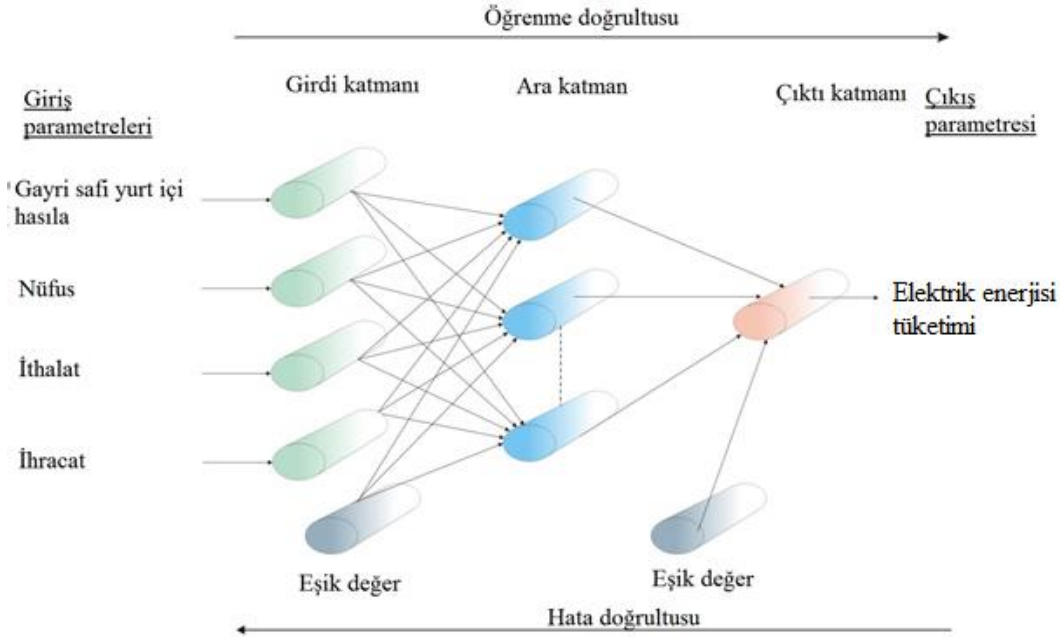
Veri seti	Yıllar	GSYİH (milyar \$)	Nüfus (milyon kişi)	İthalat (milyar \$)	İhracat (milyar \$)	Elektrik Enerjisi Tüketimi (TWh)
Eğitim seti	1980	92.86	44.74	7.91	2.91	24.62
	1981	96.92	45.54	8.93	4.70	26.29
	1982	87.41	46.69	8.84	5.75	28.32
	1983	83.09	47.86	9.24	5.73	29.57
	1984	80.72	49.07	10.76	7.13	33.27
	1985	91.41	50.66	11.34	7.96	36.36
	1986	103.30	51.43	11.10	7.46	40.47
	1987	117.87	52.56	14.16	10.19	44.93
	1988	124.60	53.72	14.34	11.66	48.43
	1989	146.07	54.89	15.79	11.62	52.60
	1990	205.38	56.47	22.30	12.96	56.81
	1991	205.33	57.19	21.05	13.59	60.50
	1992	215.65	58.25	22.87	14.71	67.22
	1993	244.12	59.32	29.43	15.35	73.43
	1994	181.21	60.42	23.27	18.11	77.78
	1995	231.38	61.53	35.71	21.64	85.55
	1996	249.27	62.67	43.63	23.22	94.79
	1997	259.81	63.82	48.56	26.26	105.52
	1998	277.43	65.00	45.92	26.97	114.02
	1999	253.38	66.20	40.67	26.59	118.48
2000	271.55	67.80	54.50	27.77	128.28	
2001	200.65	65.14	41.40	31.33	126.87	
2002	236.36	66.01	51.55	36.06	132.55	
2003	314.05	66.87	69.34	47.25	141.15	
2004	402.67	67.73	97.54	63.17	150.02	
2005	499.74	68.58	116.77	73.48	160.79	
2006	547.59	69.42	139.58	85.53	174.64	
2007	678.64	70.59	170.06	107.27	190.00	
2008	774.37	71.52	201.96	132.03	198.09	
Test seti	2009	646.89	72.56	140.93	102.14	194.08
	2010	772.37	73.72	185.54	113.88	210.43
	2011	831.69	74.72	240.84	134.91	230.31
	2012	871.12	75.63	236.55	152.46	242.37
	2013	950.35	76.67	251.66	151.80	246.36
	2014	934.86	77.70	242.18	157.61	257.22

Nüfus, ithalat ve ihracat verileri Türkiye İstatistik Kurumu'ndan (TÜİK) alınmıştır [67, 68]. EET verileri TEİAŞ'dan temin edilmiştir [1]. GSYİH verileri Türkiye Kalkınma Bakanlığı raporlarından alınmıştır [69]. YSA eğitimini kolaylaştırmak için tüm giriş ve çıkış değişkenlerini denklem (11) kullanarak [0.1, 0.9] aralığına indirgenmiştir.

$$\text{İndirgenen değer} = \left[ \frac{\text{Ham değer} - \text{Minimum değer}}{\text{Maksimum değer} - \text{Minimum değer}} \right] \times (0.9 - 0.1) + 0.1 \quad 11$$

#### 4. TAHMİN MODELİNİN GELİŞTİRİLMESİ VE PERFORMANSI (DEVELOPMENT and PERFORMANCE of FORECASTING MODEL)

Bu çalışma için Şekil 3'te gösterilen tek ara katmana sahip üç katmanlı ağ seçilmiştir. Ağın girdi katmanında GSYİH, nüfus, ithalat ve ihracat değerleri kullanılmıştır. Tahmin edilen değişken olan EET, çıktı katmanındadır. Ağı eğitmek için YAK, ÖÖTO ve Jaya algoritmaları kullanılmıştır. Eğitilen YSA modelleri için elde edilen en küçük yakınsama değerleri Tablo 2'de sunulmuştur.



Şekil 3. Elektrik enerjisi tüketimi için önerilen YSA modeli

Tablo 2. YSA eğitimi için YAK, ÖÖTO ve Jaya algoritmalarının en iyi yakınsama değerleri

YSA mimarisi	OKH		
	YAK	ÖÖTO	Jaya
4-5-1	23.869	13.828	17.765
4-10-1	30.117	31.578	39.156
4-15-1	35.689	35.426	21.272
4-20-1	26.925	30.164	25.886

En iyi yakınsama (minimum OKH) değerleri YSA-YAK (4-5-1) için 23.869, YSA-ÖÖTO (4-5-1) için 13.828 ve YSA-Jaya (4-5-1) için 17.765'tir. ÖÖTO algoritması ağ eğitiminde YAK ve Jaya algoritmalarından daha iyi performans göstermiştir. Ancak Tablo 2'de sunulan bu OKH değerleri geliştirilen YSA modellerinin eğitim seti için hesaplanan hata değerleridir ve tek başlarına ağın tahmin gücü hakkında fikir veremezler. Çünkü, bazen yerel bir çözüme takılma yada ezberleme gibi problemler nedeniyle ağın eğitim performansı yüksek çıkmakta ancak tahmin gücü düşük olmaktadır. Bu sebeple, her zaman eğitim hatası en küçük olan YSA modelinin tahmin gücü en yüksek olmamaktadır. Tahmin gücü en yüksek modeli belirleyebilmek için test seti hata değerleri dikkate alınmalıdır. Tüm YSA modelleri için test seti hata değerleri Tablo 3'de sunulmuştur. YSA-ÖÖTO (4-5-1) eğitim seti için minimum OKH değerini elde etmesine rağmen, YSA-Jaya (4-5-1) test seti için en küçük ortalama RH, OKHK ve OMH değerlerine sahiptir. Bu nedenle, en iyi model açıkça ara katmanında 5 nöron bulunduran YSA-Jaya (4-5-1) modelidir. YSA-Jaya (4-5-1) modeli için test seti verileri kullanılarak elde edilen ortalama RH, OKHK ve OMH hata değerleri sırasıyla % 0.618, 1.735 ve 1.336'dır. Ayrıca önerilen modelin doğruluğunu

göstermek için eğitim ve test setleri için R ve U-istatistik değerleri hesaplanmıştır. Önerilen YSA-Jaya modelinin eğitim ve test setleri için R değerleri sırasıyla 0.993 ve 0.996, U-istatistik değerleri ise sırasıyla 0.016 ve 0.002'dir. R ve U-istatistik değerleri önerilen modelin tahmin gücünün kabul edilebilir olduğunu göstermektedir.

**Tablo 3.** YSA-YAK, YSA-ÖÖTO VE YSA-Jaya için test seti verileri kullanılarak hesaplanan hata değerleri.

YSA mimarisi	Ortalama RH (%)			OKHK (TWh)			OMH (TWh)		
	YAK	ÖÖTO	Jaya	YAK	ÖÖTO	Jaya	YAK	ÖÖTO	Jaya
4-5-1	1.762	1.308	<b>0.618</b>	4.787	3.564	<b>1.735</b>	3.942	2.953	<b>1.336</b>
4-10-1	2.077	1.982	1.909	6.446	5.090	5.241	4.991	4.592	4.233
4-15-1	1.301	1.212	0.920	4.222	3.097	2.319	3.159	2.706	2.038
4-20-1	1.412	1.367	0.922	4.219	4.167	2.309	3.011	2.843	2.059

Koyu değerler en iyi model için elde edilen sonuçları göstermektedir.

Kankal ve Uzlu [25], Öztürk vd. [26], Akay ve Atak [29], Hamzacebi ve Es [30], Erdoğan [31], Küçükaliye Barış [35] ve Kıran vd. [38] tarafından Türkiye'nin gelecekteki EET değerlerini tahmin etmek için önerilen modellerin ortalama RH'ları sırasıyla 1.21%, 2.99%, 3.43%, 3.28%, 2.18%, 4.1% ve 2.27%'dir. Bu değerler önerilen YSA-Jaya modelinin ortalama RH değerinden büyüktür. Bununla birlikte, bu karşılaştırma önerilen YSA-Jaya modelinin performansının alternatif projeksiyon modellerinin performansından daha iyi veya daha kötü olup olmadığını göstermemektedir, çünkü çalışmalar farklı zaman aralıklarındaki veriler kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

## 5. ELEKTRİK ENERJİSİ TÜKETİM TAHMİNLERİ (ELECTRIC ENERGY CONSUMPTION PREDICTIONS)

Önerilen model kullanılarak Türkiye'nin 2015-2023 yılları arasındaki EET değerleri iki farklı senaryoya göre tahmin edilmiştir. Senaryolarda kullanılan nüfus verileri TÜİK nüfus projeksiyonundan [70] alınmıştır. Diğer değişkenler, gerçek yada ortalama büyüme oranları dikkate alınarak, iki senaryoda farklı şekillerde ele alınmıştır. Senaryolarda kullanılan veriler ve senaryolar sırasıyla Tablo 4 ve 5'te sunulmuştur.

**Tablo 4.** Senaryolarda kullanılan GSYİH, nüfus, ithalat ve ihracat değerleri

Yıl	GSYİH (Milyar \$)		Nüfus (10 <sup>6</sup> )	İthalat (Milyar \$)		İhracat (Milyar \$)	
	Büyüme oranı	Büyüme oranı	TÜİK [70]	Büyüme oranı	Büyüme oranı	Büyüme oranı	Büyüme oranı
	3.50%	6.82%		5%	11.20%	5%	13.17%
2015	967.575	998.613	78.741	254.286	269.30	165.491	178.37
2016	1001.441	1066.718	79.815	267.000	299.463	173.765	201.858
2017	1036.491	1139.468	80.811	280.350	333.002	182.453	228.443
2018	1072.768	1217.180	81.867	294.368	370.299	191.576	258.529
2019	1110.315	1300.192	82.886	309.086	411.772	201.155	292.577
2020	1149.176	1388.865	83.900	324.540	457.891	211.213	331.110
2021	1189.397	1483.585	84.909	340.768	509.174	221.773	374.717
2022	1231.026	1584.766	85.911	357.806	566.202	232.862	424.067
2023	1274.112	1692.847	86.907	375.696	629.617	244.505	479.917

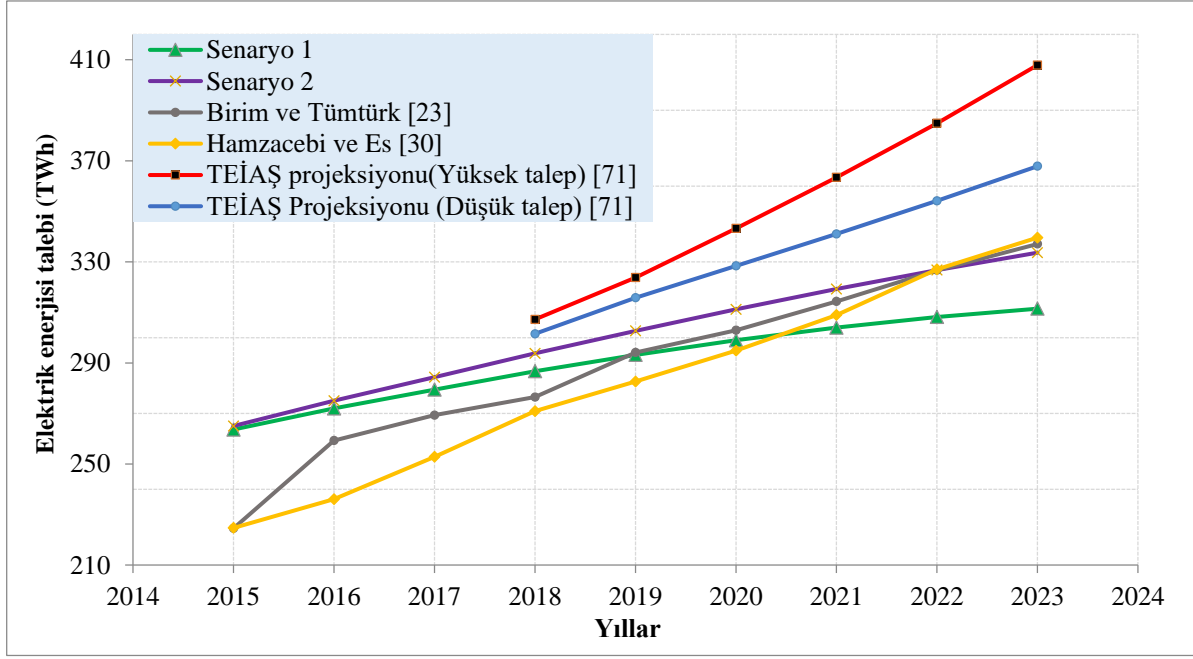
**Tablo 5.** Türkiye'nin elektrik enerjisi tüketimi için senaryolar

Senaryolar	GSYİH	Nüfus	İthalat	İhracat
Senaryo 1	Ortalama büyüme oranı (yaklaşık 3.5%)	TÜİK'den alınan nüfus verileri [70]	Ortalama büyüme oranı (yaklaşık 5%)	Ortalama büyüme oranı (yaklaşık 5%)
Senaryo 2	Gerçek büyüme oranı (yaklaşık 6.82%)	TÜİK'den alınan nüfus verileri [70]	Gerçek büyüme oranı (about 11.20%)	Ortalama büyüme oranı (yaklaşık 5%)

Tablo 6 ve Şekil 4, YSA-Jaya tarafından tahmin edilen EET değerlerini Birim ve Tümtürk [23], Hamzacebi ve Es [30], ve TEİAŞ [71] tarafından yapılan tahminlerle karşılaştırmaktadır. Şekil 4 ve Tablo 6'deki değerlere göre senaryo 1 senaryo 2'den daha düşük EET değerleri vermektedir. Şekil 4 ve Tablo 6 incelendiğinde, her iki TEİAŞ [71] senaryosunun da hem bu çalışmada hem de literatürde önerilen EET tüketim tahminlerinin [23, 30] çok üzerinde olduğu tespit edilmiştir. Dolayısıyla TEİAŞ [71] tarafından gerçekleştirilen EET projeksiyonları enerji kaynaklarının planlanması ve etkin bir şekilde kullanılması konusunda karar vericiler için yanıltıcı olmaktadır. Ayrıca Birim ve Tümtürk [23] ve Hamzacebi ve Es [30] tarafından yapılan EET tahminlerinin bu çalışmada önerilen tahminlere yakın olması önerilen modelin doğruluğunu göstermektedir. Sonuç olarak, bu çalışmaya göre, 2023 yılında Türkiye'nin EET değerinin 311.487 ile 333.640 Twh arasında olması beklenmektedir. Birim ve Tümtürk [23] ve Hamzacebi ve Es [30]'e göre ise bu değer sırasıyla yaklaşık 337 ve 339 Twh olacaktır.

**Tablo 6.** Birim ve Tümtürk [23], Hamzacebi ve Es [30], TEİAŞ projeksiyonları [71] ve senaryolara göre gelecekteki EET değerleri (TWh)

Yıl	Senaryo 1	Senaryo 2	Birim ve Tümtürk [23]	Hamzacebi ve Es [30]	TEİAŞ [71] projeksiyonu (düşük talep)	TEİAŞ [71] projeksiyonu (yüksek talep)
2015	263.626	265.037	224.512	224.723	-	-
2016	272.008	275.042	259.299	236.078	-	-
2017	279.441	284.354	269.347	252.829	-	-
2018	286.726	293.779	276.502	270.92	301.512	307.212
2019	293.193	302.683	294.144	282.629	315.807	323.788
2020	298.973	311.195	302.936	294.867	328.409	343.242
2021	303.996	319.24	314.335	308.973	341.037	363.443
2022	308.191	326.752	326.709	327.054	354.156	384.848
2023	311.487	333.640	337.087	339.575	367.876	407.889



**Şekil 4.** İki senaryo için elde edilen EET değerlerinin Birim ve Tümtürk [23], Hamzacebi ve Es [30] ve TEİAŞ [71] tarafından yapılan tahminlerle karşılaştırılması

## 6. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

EET değerlerinin farklı senaryolar altındaki tahminleri enerji politikalarının geliştirilmesi açısından kritik öneme sahiptir. EET tahminleri, önemli sermaye yatırımlarını gerçekleştirmek için verilecek kararlarda karar vericilere yardımcı olabilir [54].

Bu çalışmada, Türkiye'nin 1980 ve 2023 yılları arasındaki EET değerleri GSYİH, nüfus, ithalat ve ihracat göstergelerine dayalı olarak modellenmiştir. YSA-Jaya modeli, EET'yi tüm hata ölçümlerinde, YSA-YAK ve YSA-ÖÖTO modellerinden daha iyi tahmin etmiştir. Bu nedenle, Türkiye'nin 2015 ve 2023 yılları arasındaki EET değerlerini tahmin etmek için YSA-Jaya modeli kullanılmıştır. EET tahmini için iki farklı senaryo kullanılmıştır. İncelenen senaryolar için elde edilen EET tahminleri literatürdeki ilgili çalışmalardan [23, 30, 71] elde edilen tahminlerden daha düşük çıkmıştır. Bu çalışmaya göre Türkiye'nin 2023 yılındaki EET değeri 311.5 ile 333.6 TWh arasında olacaktır.

Bu sonuçlardan ve literatürdeki çalışmalardan [23, 25, 30, 31] görülebileceği üzere, Türkiye'deki resmi EET tahminleri gerçek EET değerlerinden önemli ölçüde yüksek olma eğilimindedir. Türkiye'deki elektrik üretiminin birincil kaynakları kömür, hidroelektrik enerji ve doğal gazdır. Ancak, Türkiye doğal gaz ve petrol kaynaklarına sahip olmadığı için bu kaynaklardan elektrik üretimini azaltmak zorundadır. Ayrıca gelişmekte olan bir ülke olarak Türkiye, kaynaklarını en verimli şekilde kullanabilmesi için EET talebini çok dikkatli bir şekilde planlamalıdır. Bu bağlamda, Türkiye'deki tüm ilgili kurumlar, EET tahminlerinin neden yanıtıcı olduğunu çözmek ve gelecekteki elektrik talebinin daha doğru tahminlerini geliştirmek için adımlar atmalıdır. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar oldukça tatmin edicidir. Bu nedenle enerji modelleme alanında Jaya algoritmasının kullanımı teşvik edilmelidir.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Türkiye Elektrik İletim A.Ş. (TEİAŞ). Türkiye brüt elektrik enerjisi üretim-ithalat-ihracat ve talebinin yıllar itibariyle gelişimi. <https://www.teias.gov.tr/tr/iii-elektrik-enerjisi-uretimi-tuketimi-kayıplar> Erişim Tarihi Ağustos, 20, 2019.
- [2] S. Ding, K.W. Hipel, Y. Dang, Forecasting China's electricity consumption using a new grey prediction model, Energy 149 (2018) 314–28.

- [3] S.H.A. Kaboli, A. Fallahpour, J. Selvaraj, N.A. Rahim, Long-term electrical energy consumption formulating and forecasting via optimized gene expression programming, *Energy* 126 (2017) 144-64.
- [4] N. Xu, Y. Dang, Y. Gong, Novel grey prediction model with nonlinear optimized time response method for forecasting of electricity consumption in China, *Energy* 118 (2017) 473-80.
- [5] A. Kasule, K. Ayan, Forecasting Uganda's net electricity consumption using a hybrid pso-abc algorithm. *Arabian Journal for Science and Engineering* 44 (2019) 3021-31.
- [6] S.H.A. Kaboli, J. Selvaraj, N.A. Rahim, Long-term electric energy consumption forecasting via artificial cooperative search algorithm, *Energy* 115 (2016) 857-71.
- [7] A. Askarzadeh, Comparison of particle swarm optimization and other metaheuristics on electricity demand estimation: a case study of Iran, *Energy* 72 (2014) 484-91.
- [8] N. An, W. Zhao, J. Wang, D. Shang, E. Zhao, Using multi-output feedforward neural network with empirical model decomposition based signal filtering for electricity demand forecasting, *Energy* 49 (2013) 279-88.
- [9] S.S. Pal, S. Kar, Time series forecasting for stock market prediction through data discretization by fuzzistics and rule generation by rough set theory, *Mathematics and Computers in Simulation* 162 (2019) 18-30.
- [10] S. Das, D. Malakar, S. Kar, T. Pal, Correlation measure of hesitant fuzzy soft sets and their application in decision making, *Neural Computing and Applications* 31 (2019) 1023-1039.
- [11] H.T. Pao, Comparing linear and nonlinear forecasts for Taiwan's electricity consumption, *Energy* 31 (2006) 2129-41.
- [12] L. Wang, H. Hu, X.Y. Ai, H. Liu, Effective electricity energy consumption forecasting using echo state network improved by differential evolution algorithm, *Energy* 153 (2018) 801-15.
- [13] R.E. Gonzalez, M.M. Jaramillo, F.D. Carmona, Monthly electric energy demand forecasting based on trend extraction, *IEEE Transactions on Power Systems* 21 (2006) 1946-53.
- [14] F.J. Ardakani, M.M. Ardehali, Long-term electrical energy consumption forecasting for developing and developed economies based on different optimized models and historical data types, *Energy* 65(2014) 452-61.
- [15] S. S. Pal, S. Kar, A hybridized forecasting method based on weight adjustment of neural network using generalized type-2 fuzzy set, *International Journal of Fuzzy Systems* 21(2019) 308-320.
- [16] C. Hamzacebi, F. Kutay, Electric consumption forecasting of Turkey using artificial neural networks up to year 2010, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University* 19 (2004) 227-33.
- [17] C. Hamzacebi, Forecasting of Turkey's net electricity energy consumption on sectoral bases, *Energy Policy* 35 (2007) 2009-16.
- [18] K. Kavaklioglu, H. Ceylan, H.K. Ozturk, O.E. Canyurt, Modeling and prediction of Turkey's electricity consumption using artificial neural networks, *Energy Conversion Management* 50 (2009) 2719-27.
- [19] M. Bilgili, Estimation of net electricity consumption of Turkey, *Journal of Thermal Science and Technology* 29 (2009) 89-98.
- [20] G. Oğcu, O.F. Demirel, S. Zaim, Forecasting electricity consumption with neural networks and support vector regression, *Procedia-Social and Behavioral Sciences* 58 (2012) 1576-85.



- [21] F. Gürbüz, C. Öztürk, P. Pardalos, Prediction of electricity energy consumption of Turkey via artificial bee colony: a case study, *Energy Systems* 4 (2013) 289–300.
- [22] F. Kaytez, M.C. Taplamacioglu, E. Cam, F. Hardalac, Forecasting electricity consumption: a comparison of regression analysis, neural networks and least squares support vector machines, *Electrical Power and Energy Systems* 67 (2015) 431–8.
- [23] Ş. Birim, A. Tümtürk, Modeling and forecasting Turkey's electricity consumption by using artificial neural network, *American Scientific Research Journal for Engineering, Technology and Sciences* 25 (2016) 192–208.
- [24] M. E. Günay, Forecasting annual gross electricity demand by artificial neural networks using predicted values of socio-economic indicators and climatic conditions: case of Turkey, *Energy Policy* 90 (2016) 92–101.
- [25] M. Kankal, E. Uzlu, Neural network approach with teaching-learning-based optimization for modeling and forecasting long-term electric energy demand in Turkey, *Neural Computing and Applications* 28 (2017) 737–47.
- [26] H.K. Ozturk, H. Ceylan, O.E. Canyurt, A. Hepbasli, Electricity estimation using genetic algorithm approach: a case study of Turkey, *Energy* 30 (2005) 1003–12.
- [27] Z. Yumurtaci, E. Asmaz, Electric energy demand of Turkey for the year 2050, *Energy Sources* 36 (2004) 1157–64.
- [28] M. Tunc, U. Camdali, C. Parmaksizoglu, Comparison of Turkey's electrical energy consumption and production with some european countries and optimization of future electrical power supply investments in Turkey, *Energy Policy* 34 (2006) 50–9.
- [29] D. Akay, M. Atak. Grey prediction with rolling mechanism for electricity demand forecasting of Turkey, *Energy* 32 (2007) 1670–5.
- [30] C. Hamzacebi, H.A. Es, Forecasting the annual electricity consumption of Turkey using an optimized grey model, *Energy* 70 (2014) 165–71.
- [31] E. Erdogdu, Electricity demand analysis using cointegration and ARIMA modelling: a case study of Turkey, *Energy Policy* 35 (2007) 1129–46.
- [32] K.K. Sumer, O. Goktas, A. Hepsag, The application of seasonal latent variable in forecasting electricity demand as an alternative method, *Energy Policy* 37 (2009) 1317–22.
- [33] Z. Dilaver, L.C. Hunt, Turkish aggregate electricity demand: an outlook to 2020, *Energy* 36 (2011) 6686–96.
- [34] M.D. Toksarı, Estimating the net electricity energy generation and demand using the ant colony optimization approach: case of Turkey, *Energy Policy* 37 (2009) 1181–7.
- [35] S. Kucukali, K. Baris, Turkeys short-term gross annual electricity demand forecast by fuzzy logic approach, *Energy Policy* 38 (2010) 2438–45.
- [36] O. Demirel, A. Kakilli, M. Tektas, Electric energy load forecasting using anfis and arma methods, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University* 25 (2010) 601–10.
- [37] K. Kavaklioglu, Modeling and prediction of Turkey's electricity consumption using support vector regression, *Applied Energy* 88 (2011) 368–75.
- [38] M.S. Kiran, E. Özceylan, M. Gündüz, T. Paksoy, Swarm intelligence approaches to estimate electricity energy demand in Turkey, *Knowledge-Based System* 36 (2012) 93–103.

- [39] M. F. Tefek, H. Uguz, Estimation of turkey electric energy demand until year 2035 using TLBO algorithm, *Intelligent Systems and Applications in Engineering* 4 (2016) 48-52
- [40] M. Kankal, A. Akpınar, M.İ. Kömürcü, T.Ş. Özşahin, Modeling and forecasting of Turkey's energy consumption using socio-economic and demographic variables, *Applied Energy* 88 (2011) 1927-39.
- [41] E. Uzlu, M. Kankal, A. Akpınar, T. Dede, Estimates of energy consumption in Turkey using neural networks with the teaching-learning-based optimization algorithm, *Energy* 75 (2014) 295-303.
- [42] E. Uzlu, A. Akpınar, H.T. Öztürk, S. Nacar, M. Kankal, Estimates of hydroelectric generation using neural networks with artificial bee colony algorithm for Turkey, *Energy* 69 (2014) 638-47.
- [43] R.V. Rao, D.P. Rai, J. Ramkumar, J. Balic, A new multi-objective Jaya algorithm for optimization of modern machining processes, *Advances in Production Engineering & Management* 11 (2016) 271-86.
- [44] M. Bhoje, M.H. Pandya, S. Valvi, I.N. Trivedi, P. Jangir, S.A. Parmar, An emission constraint economic load dispatch problem solution with microgrid using JAYA algorithm, In: 2016 International conference on energy efficient technologies for sustainability (ICEETS) Nagercoil, (2016) 497-502.
- [45] R.V. Rao, K.C. More, Design optimization and analysis of selected thermal devices using self-adaptive Jaya algorithm, *Energy Conversion and Management* 140 (2017) 24-35.
- [46] T. Dede, Jaya algorithm to solve single objective size optimization problem for steel grillage structures, *Steel And Composite Structures* 26 (2018) 163-70.
- [47] R.V. Rao, Jaya: A simple and new optimization algorithm for solving constrained and unconstrained optimization problems, *International Journal of Industrial Engineering Computations* 7 (2016) 19-34.
- [48] R.V. Rao, K.C. More, J. Taler, P. Oclon, Dimensional optimization of a micro-channel heat sink using Jaya algorithm, *Applied Thermal Engineering* 103 (2016) 572-82.
- [49] D.C. Du, H.H. Vinh, V.D. Trung, N.T.H. Quyen, N.T. Trung, Efficiency of Jaya algorithm for solving the optimization-based structural damage identification problem based on a hybrid objective function, *Engineering Optimization* 50 (2018) 1233-51.
- [50] M. Çunkaş, A. A. Altun, Long term electricity demand forecasting in Turkey using artificial neural networks, *Energy Sources, Part B: Economics, Planning and Policy* 5 (2010) 279-89.
- [51] V. Gümüş, A. Başak, K. Yengün, Yapay sinir ağları ile Şanlıurfa istasyonunun kuraklığının tahmini, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji* 6 (2018) 621-633.
- [52] D. Karaboga, An idea based on honey bee swarm for numerical optimization. Technical Report-TR06, Erciyes University Engineering Faculty Computer Engineering Department 2005.
- [53] E. Uzlu, M.İ. Kömürcü, M. Kankal, T. Dede, H.T. Öztürk, Prediction of berm geometry using a set of laboratory tests combined with teaching-learning-based optimization and artificial bee colony algorithms, *Applied Ocean Research* 48 (2014) 103-13.
- [54] C. Ozkan, O. Kisi, B. Akay, Neural networks with artificial bee colony algorithm for modeling daily reference evapotranspiration, *Irrigation Science* 29 (2011) 431-41.
- [55] R.V. Rao, V.J. Savsani, D.P. Vakharia, Teaching-learning-based optimization: a novel method for constrained mechanical design optimization problems, *Computer-Aided Design* 43 (2011) 303-15.

- [56] M.F. Tefek, H. Uğuz, M. Güçyetmez, A new hybrid gravitational search–teaching–learning-based optimization method for energy demand estimation of Turkey, *Neural Computing and Applications* 31 (2019) 2939-54.
- [57] T. Dede, Y. Ayvaz, Combined size and shape optimization of structures with a new meta-heuristic algorithm, *Applied Soft Computing* 28 (2015) 250–8.
- [58] T. Dede, Optimum design of grillage structures to LRFD–AISC with teaching–learning based optimization, *Structural and Multidisciplinary Optimization* 48 (2013) 955–64.
- [59] R.V. Rao, A. Saroj, Constrained economic optimization of shell-and-tube heat exchangers using elitist-Jaya algorithm, *Energy* 128 (2017) 785–800.
- [60] R.V. Rao, Jaya: A Simple and New Optimization Algorithm For Solving Constrained and Unconstrained Optimization Problems, *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 7 (2016) 19–34.
- [61] E. Uzlu, Kıyıya dik katı madde hareketi sonucu oluşan yığılma profilinin fiziksel modelle incelenmesi, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Trabzon 2016.
- [62] R.V. Rao, G. Waghmare, A new optimization algorithm for solving complex constrained design optimization problems, *Engineering Optimization* 49 (2017) 60–83.
- [63] E. Uzlu, Türkiye için gri kurt optimizasyon algoritması ile yapay sinir ağlarını kullanarak enerji tüketiminin tahmini, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji* 7 (2018) 245–262.
- [64] H.A. Es, F.Y. Kalender, C. Hamzaçebi, Forecasting the net energy demand of Turkey by artificial neural networks, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University* 29 (2014) 495–504.
- [65] A.R. Rafieerad, A.R. Bushroa, B. Nasiri-Tabrizi, A. Fallahpour, J. Vadivelu, S.N. Musa, S.H.A. Kaboli, GEP-based method to formulate adhesion strength and hardness of Nb PVD coated on Ti-6Al-7Nb aimed at developing mixed oxide nanotubular arrays, *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials* 61 (2016) 182–96.
- [66] A.R. Rafieerad, A.R. Bushroa, B. Nasiri-Tabrizi, S.H.A. Kaboli, S. Khanahmadi, A. Amiri, J. Vadivelu, F. Yusof, W. J. Basirun, K. Wasa, Toward improved mechanical, tribological, corrosion and in-vitro bioactivity properties of mixed oxide nanotubes on Ti-6Al-7Nb implant using multi-objective PSO, *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials* 69 (2017) 1–18.
- [67] Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK). Nüfus ve demografi, nüfus istatistikleri. <http://www.tuik.gov.tr/UstMenu.do?metod=temelist>. Erişim Tarihi Ağustos, 17, 2018.
- [68] Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK). Dış ticaret, yıllara göre dış ticaret. <http://www.tuik.gov.tr/UstMenu.do?metod=temelist>. Erişim Tarihi Temmuz, 17, 2018.
- [69] Türkiye Cumhuriyeti Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı, Gösterge ve istatistikler, göstergeler, ekonomik ve sosyal göstergeler, 1. Bölüm Milli gelir ve üretim. <http://www.sbb.gov.tr/ekonomik-ve-sosyal-gostergeler/> Erişim Tarihi Ağustos, 20, 2019.
- [70] Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK). Temel istatistikler, nüfus ve demografi, nüfus projeksiyonları. <http://www.tuik.gov.tr/UstMenu.do?metod=temelist> Erişim Tarihi Ağustos, 20, 2019.
- [71] Türkiye Elektrik İletim A.Ş. (TEİAŞ). 10 Yıllık talep tahminleri raporu. [https://www.teias.gov.tr/sites/default/files/2018-02/Taleprapor\\_2017.pdf](https://www.teias.gov.tr/sites/default/files/2018-02/Taleprapor_2017.pdf) Erişim Tarihi Ağustos, 20, 2019.

## Use of Polysulfone-g-Polystyrene / Cellulose / Poly (ethylene tereftalate) Composite Membranes in Osmotic Distillation

 Gülşen TAŞKIN ÇAKICI 

Cumhuriyet University Yıldızeli Vocational School, Department of Chemical and Chemical Processing Technologies, Yıldızeli / SİVAS

### Graphical/Tabular Abstract

#### Article Info:

Research article  
 Received: 07/02/2020  
 Revision: 18/06/2020  
 Accepted: 03/07/2020

#### Highlights

- OD principle
- Composite membrane
- Concentration of fructose

#### Keywords

Osmotic  
 Distillation Polysulfone-g-  
 polystyrene / cellulose /  
 Poly (ethylene tereftalate)  
 Composite Membrane  
 Fructose

In this study, it is aimed to concentrate the fructose solution by using new composite membranes by osmotic distillation (OD) method. Fructose solutions were used to concentrate polysulfone-g-polystyrene (PSf-g-PS) graft copolymers with composite membranes prepared with cellulose / poly (ethylene terephthalate). The membranes were prepared by the phase inversion method and characterized by Scanning Electron Microscopy (SEM). The effects of various process parameters such as feed and brine solutions concentrations, type of brine and temperature on flux were investigated. The increase in temperature increased the flux. The highest flux in brine solution concentration was observed in the concentration close to saturation. The highest flow was obtained in  $MgCl_2$ .

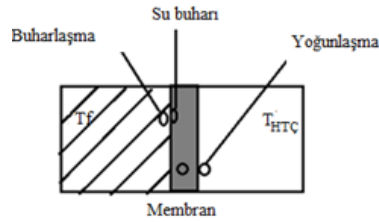


Figure A. Principle of OD

**Purpose:** The main purpose of this study, investigation of the effects of some parameters (brine and fructose circulation rate, temperature) on the flux using new PSf-g-PS / Cellulose / Poly (ethylene terephthalate) composite membranes in osmotic distillation.

**Theory and Methods:** The composite membranes were prepared by the phase inversion method. The fructose solution was concentrated by osmotic distillation method.

**Results:** The increase in temperature increased the flux. The highest flux in brine solution concentration was observed in the concentration close to saturation. The highest flow was obtained in  $MgCl_2$ . The flux increased with increasing temperature, and the transfer activation energy was found to be 5.87 kJ / mol.

**Conclusion:** It was observed that the flux increases significantly with temperature, brine type and concentration in OD method. PSf-g-PS / Cellulose / Poly (ethylene terephthalate) composite membranes was found to be suitable membranes for the concentration fructose solutions by osmotic distillation.



## Ozmotik Distilasyonda Polisülfon-g-Polistiren/Selüloz/Poli (etilen teraftalat) Kompozit Membranların Kullanılması

Gülşen TAŞKIN ÇAKICI

Cumhuriyet Üniversitesi Yıldızeli Meslek Yüksekokulu, Kimya ve Kimyasal İşleme Teknolojileri Bölümü, Yıldızeli / SİVAS

### Öz

Bu çalışmada fruktoz çözeltilerinin ozmotik distilasyon yöntemi kullanılarak, polisülfon-g-polistiren (PSf-g-PS) aşırı kopolimerlerinin selüloz/poli(etilen teraftalat) (CV/PET) ile hazırlanmış olan kompozit membranlarla deriştirilmesi çalışılmıştır. Membranlar faz dönüşümü yöntemi ile hazırlanmış ve Taramalı Elektron Mikroskopisi (SEM) ile karakterize edilmiştir. Besleme ve brine çözeltileri derişimleri, brine çeşidi ve sıcaklık gibi çeşitli proses parametrelerinin akı üzerine etkileri araştırılmıştır. Sıcaklıktaki artış akıyı artırmıştır. Brine çözelti derişiminde en yüksek akı doyunluğa yakın olan derişimde gözlenmiştir. En yüksek aktarım  $MgCl_2$ ' de elde edilmiştir

### Makale Bilgisi

*Araştırma makalesi*  
 Başvuru: 07/02/2020  
 Düzeltilme: 18/06/2020  
 Kabul: 03/07/2020

### Anahtar Kelimeler

*Osmotic Distilasyon*  
 Polisülfon-g-  
 Polistiren/selüloz/Poli(etilen  
 teraftalat)  
 Kompozit Membran  
 Fruktoz

### Keywords

*Osmotic Distillation*  
 Polysulfone-g-polystyrene /  
 cellulose / Poly (ethylene  
 teraftalate)  
 Composite Membrane  
 Fructose

### Use of Polysulfone-g-Polystyrene / Cellulose / Poly (ethylene teraftalate) Composite Membranes in Osmotic Distillation

### Abstract

In this study, fructose solutions were used to concentrate polysulfone-g-polystyrene (PSf-g-PS) graft copolymers with composite membranes prepared with cellulose / poly (ethylene terephthalate) (CV/PET) using osmotic distillation method. The membranes were prepared by the phase inversion method and characterized by Scanning Electron Microscopy (SEM). The effects of various process parameters such as feed and brine solutions concentrations, type of brine and temperature on flux were investigated. The increase in temperature increased the flux. The highest flux in brine solution concentration was observed in the concentration close to saturation. The highest flow was obtained in  $MgCl_2$ .

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Ozmotik distilasyon; Brine olarak adlandırılan  $NaCl$ ,  $CaCl_2$  ve  $MgSO_4$  gibi çeşitli tuzlardan hazırlanmış derişik tuzlu su çözeltileri ile deriştirilmesi düşünölen çözeltilerinin (besleme çözeltisi) hidrofobik membranlar (politetrafloraetilen, polipropilen, polivinilidenklorür..vb) kullanılmasıyla gerçekleştirilen bir ayırma prosesidir. Bu prosede yürütücü kuvvet buhar basıncı farkıdır. Ozmotik distilasyonun basit ve sürekli bir sistem olması (oda koşullarında rahatlıkla çalışılabilmesi), işleme süresinin az olması, teçhizat maliyetinin düşük olması, ısıya karşı duyarlı bileşiklerde renk, koku, tat...vb kaybının olmaması, ek işlem gerektirmemesi gibi avantajlara sahip olması,OD'yi diğer membran proseslerinden ayıran önemli özelliklerdir.Ozmotik distilasyonda kullanılan membranın önemi büyüktür. Geçmiş yıllarda kalın membranlardan düşük akı elde edilmesi nedeniyle ozmotik distilasyonun ticari kullanımından tam olarak yararlanılamamıştır. Son yıllarda ince membranların kullanımı ile birlikte artan akı, ısıya duyarlı gıdaların konsantrasyonunda ozmotik distilasyonabüyük önem kazandırmaktadır.

Polisülfon (PSf), mükemmel mekanik mukavemet, sıkıştırma direnci, kimyasal ve termal kararlılığa sahip popüler bir mühendislik malzemesidir [1,2]. PSf membranlar faz dönüşüm tekniği ile kolaylıkla hazırlanabilmektedir. Bu membranlar ultrafiltrasyon, atık su arıtma, gaz ayırma, ters osmoz, hemodiyaliz, yiyecek ve içecek işleme gibi birçok ayırma prosesinde kullanılır [3]. PSf membranının mekanik

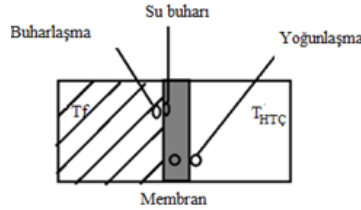
özelliklerini iyileştirmek ve hidrofobikliğini arttırmak için, polimer zincirlerine hidrofobik grupların sokulmasında; karıştırma yöntemi, "foto-aşılama" yöntemi ve "üzerine foto-aşılama" yöntemi dahil olmak

üzere birçok yöntem kullanılmaktadır [4]. Fotokimyasal modifikasyon avantajlı bir yöntemdir. PSf polimeri doğası gereği ışığa duyarlıdır ve fotokimyasal yöntemle ile kolayca modifiyeedilebilir [5]. Literatürde dialil dimetil amonyum klorür [6], akrilik asit [7], poli (etilen glikol) metakrilat [8], [2-(akriloyloksi) etil] -trimetil amonyum klorür gibi çeşitli monomerler kullanılarak PSf membran yüzey modifikasyonları gerçekleştirilmiştir [9]. Ayrıca blend ve kompozit (polisülfon/poliererimid, polisülfon/selülozasetat fitalat, polisülfon/n-TiO<sub>2</sub>.....vb) formlarıda literatürde bulunmaktadır [10-12].

Bu çalışmada ozmotik distilasyonda hidrofobik karakteri ve gözenekli yapısıyla literatüre alternatif oluşturacak yeni kompozit membranlar hazırlanmış ve bu yeni kompozit membranların besleme çözeltisi fruktozun OD ile deriştirilmesinde; besleme ve brine derişimlerinin, sirkülasyon hızlarının, brine çeşidinin ve sıcaklığın aktarım üzerine etkileri araştırılmıştır. Kompozit membranlar, bir önceki çalışmamızdastiren monomerinin UV ışını kullanılarak PSf polimerine aşılama sonucu elde edilmiş(polisülfon-graft-polistiren (PSf-g-PS)) aşu kopolimerin,selüloz/polietilenteraftalat (CV/PET) dokumasız materyal ile hidrofobik karakteri arttırılarak hazırlanmıştır.

### OD Prensibi (OD Prenciple)

OD prensibi, membran yüzeyi ve membran sınır tabakasında ilk olarak besleme sınır tabakasında su buharlaşması, ikinci olarak su buharının membran gözeneklerinden transfer olması, en son aşamada ise brine sınır tabakasında suyun yoğunlaşmasına dayanmaktadır (Şekil1).



Şekil 1. OD Prensibi

### 1.2.Ozmotik Distilasyon Membranında Kütle Transferi (Mass Transfer in Osmotic Distillation Membrane)

OD de su aktarım mekanizması membran distilasyonundaki aktarım mekanizması ile aynıdır.

$$P_B = P^0 a_B \quad 1$$

$$P_{brine} = P^0 a_{brine} \quad 2$$

Eşitliklerde;  $P^0$  saf suyun buhar basıncı,  $a_B$  besleme çözeltisinde su aktivitesi,  $a_{brine}$  brine çözeltisinde suyun aktivitesi,  $P_B$  besleme çözeltisinin buhar basıncı,  $P_{brine}$  brine çözeltisi buhar basıncı şeklindedir. Yürütücü kuvvet ( $P_B - P_{brine}$ ); su aktivite farkından ( $a_B > a_{brine}$ ) oluşan buhar basıncı farkıdır. Toplam kütle transfer katsayısı, akının sürücü kuvvete oranıdır [13].

$$K = J / (P_B - P_{brine}) \quad 3$$

J ve K sırasıyla; su akısı ( $\text{kgm}^{-2} \text{saat}^{-1}$ ), toplam kütle transfer katsayısıdır ( $\text{J Pa}^{-1}$ ).

### 1.3. OD'de Akı (Flux in OD)

OD'de akı Eş.4 ile hesaplanmaktadır [14].

$$J = m_{su} / At \quad 4$$

Eşitlikte J akı ( $\text{kg/m}^2$  saat),  $m_{su}$  geçen su kütlesi (kg), A membran yüzey alanı ( $\text{m}^2$ ), t süre (saat) olarak verilmiştir.

### 1.4. Aktarım Aktivasyon Enerjisi (Transfer Activation Energy)

Polimerik membranlardan madde aktarımının sıcaklıkla değişimi Arrhenius tipi davranış gösterir [15-17] ve Eş. 5 ile verilmiştir,

$$J = A \cdot e^{-E/RT} \quad 5$$

J : Akı

A : Arrhenius sabiti

E : Aktarım aktivasyon enerjisidir.

Bu eşitlik göz önüne alınarak  $\ln J$  ye karşı  $1/T$  grafiğe çizildiğinde, eğim aktarım aktivasyon enerjisini (E) verir. Aktarım aktivasyon enerjisi tercihen aktarılan bileşenin transferinin ve sıcaklıktan etkilenmesinin bir ölçüsüdür [18].

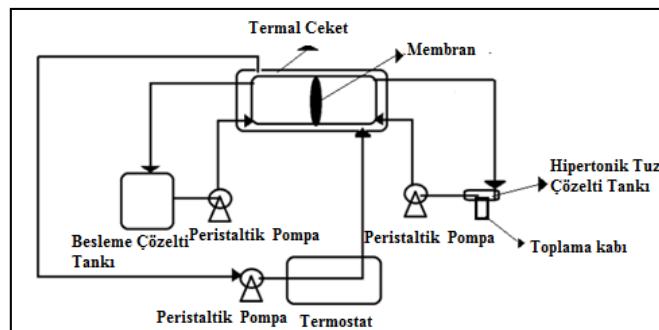
## 2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR (EXPERIMENTAL STUDY)

### 2.1. Materyaller (Materials)

NaCl,  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{MgCl}_2$ , D-Fruktoz, dioktilftalat (DOP) Merck firmasından temin edilmiştir. Selüloz/poli(etilenteraftalat) (viskon/polyester) dokumasız kumaş materyali Sapro Temizlik Ürünleri Sanayi ve Ticaret A.Ş. şirketinden temin edilip kullanılmıştır.

### 2.2. Ozmotik Distilasyon Düzeneği (Osmotic Distillation Mechanism)

Ozmotik Distilasyon düzeneğinin şematik şekli Şekil 2'de verilmiştir. İki ayrı bölmeden oluşan hücrede, iki bölme birbirine çelik kelepçe ile birleştirilmiştir. Her bölmede sirkülasyon peristaltik pompa ile sağlanmıştır. Deney esnasında sıcaklığın sabit kalması için, OD hücresi dış çeperlerinde sabit sıcaklıktaki su banyosundan gelen su sirküle ettirilmiştir.



Şekil 2. OD şematik gösterimi

### 2.2. Kompozit Membranlarının Hazırlanması (Preparation of Composite Membranes)

Bir önceki çalışmamızda PSf-g-PS aşırı kopolimerleri, hidrofobik stiren (St) monomerinin UV ışınları kullanılarak polisülfon (PSf) polimeri üzerine aşırı kopolimerleşmesi ile elde edilmiştir. Aşılama azot

atmosferinde gerçekleştirilip ve benzofenon ışığa duyarlı madde olarak kullanılmıştır. PSf-g-PS aşırı kopolimerlerinin, selüloz / poli(etilenteraftalat) (CV/PET) dokumasız (nonwoven) materyali ile kompozit membranları, jelleşme periyodu sonrası çözücü-çöktürücü banyosuna daldırılarak hazırlanmıştır [19-21]. Aşırı kopolimer çözeltisine plastikleştirici olarak diokdiltalat (DOP), membranda oluşacak büzülmeyle engellemek amacıyla kullanılmıştır.

### 2.3. Karakterizasyon Çalışmaları (Characterization Studies)

#### 2.3.1. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) (Scanning Electron Microscope)

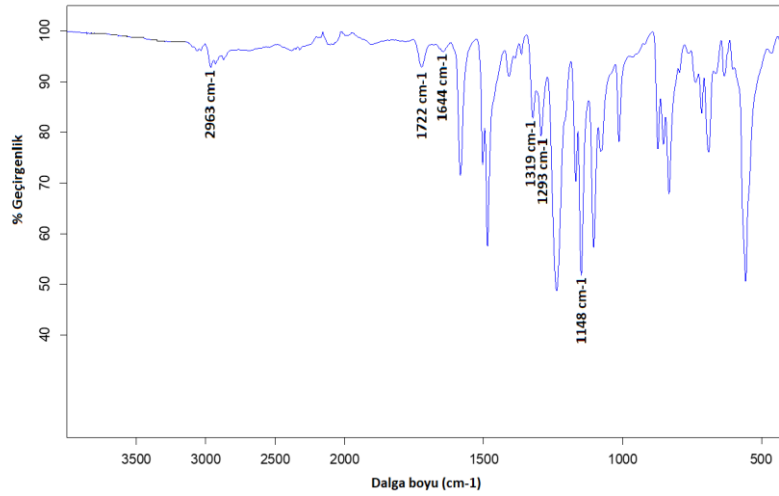
Membran örneklerinin mikrografları, numuneler altın ile kaplandıktan sonra JSM 5600 model taramalı elektron mikroskobu kullanılarak alındı.

#### 2.3.2. Temas Açısı Ölçüm Cihazı (Contact Angle Micrometer)

Membran örneklerinin temas açıları Surface Electro Optics PHX 150 model temas açısı ölçüm cihazı kullanılarak yapıldı.

#### 2.3.3. Fourier Transform Infrared Spektrofotometresi (FTIR) (Fourier Transform Infrared Spectrophotometer)

Hazırlanan kompozit membranörneğin FTIR analizleri, Bruker Mode:Tensor II model spektrometre kullanılarak yapılmıştır.



Şekil 3. PSf-g-PS / CV/PET membranların FTIR analizi

Sırasıyla 2963, 1722, 1644, 1148, 1319 ve 1293  $\text{cm}^{-1}$ 'e karşılık gelen karakteristik -CH, C=O, -OH, simetrik C-SO<sub>2</sub>-C, asimetrik C-SO<sub>2</sub>-C bantlarına sahip FTIR, bu kompozit membranın yüksek saflığını göstermektedir.

#### 2.3.4. Denge Su İçeriği (Equilibrium Water Content)

Hazırlanan membranların denge su içeriği teorik olarak sırasıyla Eş.6 ile hesaplandı [10].

$$\text{DSİ (\%)} = [(m_1 - m_k) / m_1] \times 100$$

6

DSİ: Denge su içeriği

$m_1$  : Islak membran kütlesi (g)

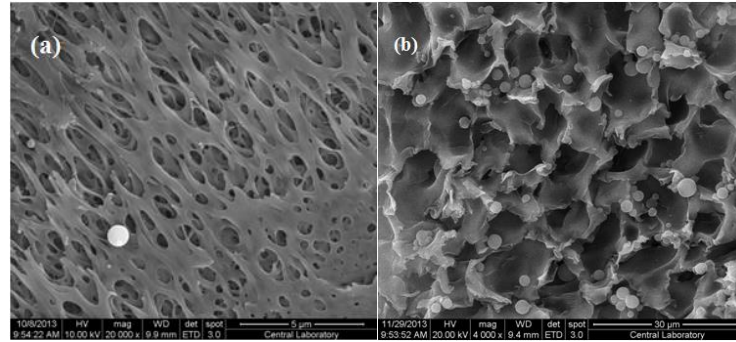


$m_k$  : Kuru membran kütlesi (g)

Hazırlanan membranın gözenek boyutu ve denge su içeriği Tablo 1’de, SEM görüntüleri ise Şekil 4’de verilmiştir.

**Tablo 1.** PSf-g-PS / CV/PET membranların gözenek boyutu, denge su içeriği ve temas açısı

MEMBRAN	Gözenek Boyutu ( $\mu\text{m}$ )	Denge Su İçeriği (%DSİ)	Temas Açısı ( $^\circ$ )
PSf-g-PS/ CV/PET Kompozit Membran	$9,41 \pm 1,27$	15,05	$114 \pm 0,7$



**Şekil 4.** PSf-g-PS / CV/PET membranların (a) yüzey (20000 büyütmeli) ve (b) kesit (4000 büyütmeli) SEM mikrografları

Denge su içeriği membranların hidrofobikliği ve akıdaki davranışının dolaylı göstergesidir. Hazırlanan membranların Tablo-1’ de görüldüğü üzere düşük denge su içeriğine sahip olması ve yüksek temas açısı değeri aktarım için önem arz eden hidrofobikliğin göstergesidir. Ayrıca SEM görüntüleri incelendiğinde ozmotik distilasyon için kullanılan membranların mikro gözenek boyutuna sahip bir yapıda olduğu sonucunu desteklemektedir.

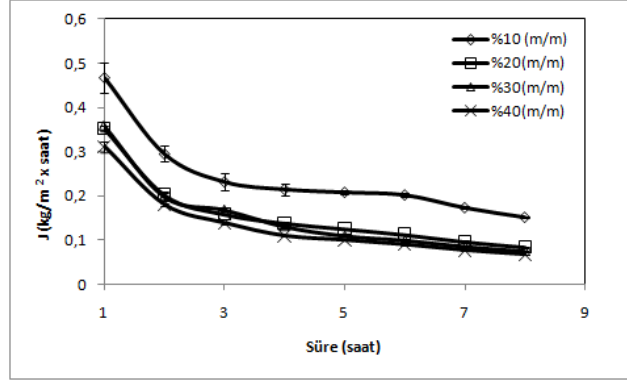
#### 2.4. Ozmotik Distilasyon (OD) Çalışması (Osmotic Distillation (OD) Study)

Polisülfon-g-Polistiren / selüloz / poli(etilenteraftalat) (PSf-g-PS / CV/PET) kompozit hidrofobik membranlar ozmotik distilasyon için tasarlanan hücreye yerleştirildi ve OD prosesi uygulandı. Akı değerleri Eş.4 ve membran kütle transfer katsayısı Eş.5 ile hesaplandı.

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

#### 3.1. Besleme Çözelti Derişiminin Akıya Etkisi (Effect of Feed Solution Concentration on Flux)

Brine olarak %20 (m/m) NaCl çözeltisi kullanılarak, %10, %20, %30, %40 (m/m) derişimlerinde besleme (fruktoz) çözeltisinin akı üzerine etkisi incelendi. Elde edilen sonuçlar Şekil 5’de verildi.



**Şekil 5.** PSf-g-PS / CV/PET membranlarda besleme çözeltisi derişiminin akı üzerine etkisi ( Brine: %20 (m/m) NaCl,  $T=30 \pm 1^\circ\text{C}$ , Brine sirkülasyon hızı: 100 rpm, Besleme çözeltisi sirkülasyon hızı: 200 rpm  $\delta: 60 \pm 5 \mu\text{m}$ )

Şekillerden de görüldüğü gibi en yüksek akı %10(m/m) fruktoz çözeltisinde elde edildi. Farklı derişimlerde besleme çözeltisi için toplam kütle transfer katsayısı (K) Eş 3 ile hesaplandı vesonuçlar Tablo 2’de verildi. Yüksek besleme çözelti derişimi viskoziteyi artırarak, yürütücü kuvvet olan ozmotik basıncın azalmasına, dolayısıyla aktarım için gerekli olan enerjinin daha da artmasına sebep olmaktadır. Tablo 2’de görüldüğü gibi, aktarımın derişimle azalması, toplam kütle transfer katsayısının artan derişim ile azalmasına da atfedilebilir. Artan besleme çözelti derişimi ile akının azalması, besleme tarafında membran sınır tabakasında direncin artmasına, aktarımda önemli bir rolü olan kütle transfer katsayısının azalmasına neden olması ile ilişkilendirilebilir.

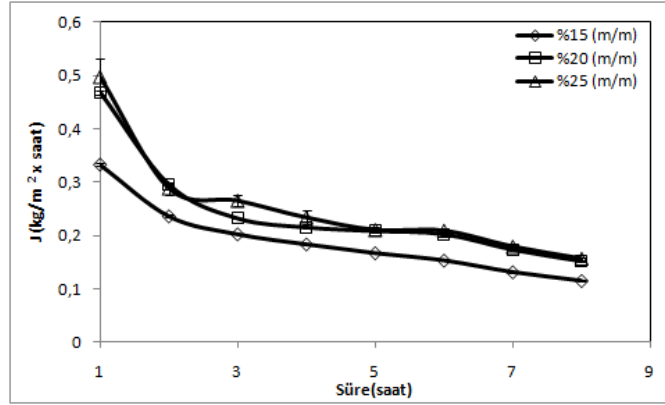
**Tablo 2.** Farklı besleme çözeltisi derişimleri için hesaplanan toplam kütle transfer katsayıları

BÇ Derişimi(% m/m)	J (kg/ m <sup>2</sup> saat)	Toplam Kütle Transfer Katsayısı K (10 <sup>-3</sup> kg m <sup>-2</sup> h <sup>-1</sup> Pa <sup>-1</sup> )
10	0,16	0,54
20	0,08	0,38
30	0,07	0,37
40	0,06	0,35

Petrotos ve arkadaşları [22], OD ile domates suyunun deriştirilmesinde, artan besleme çözelti derişimi ile toplam kütle transfer katsayısının ve ozmotik akının azaldığını ifade etmişlerdir. Kujawski ve arkadaşları [23], PTFE membranlarla kırmızı üzüm suyunun OD ile deriştirilmesinde, besleme çözelti derişiminin artması ile aktarımın azaldığını gözlemlemişlerdir.

### 3.2. Brine Derişiminin Akıya Etkisi (Effect of Brine Concentration on Flux)

PSf-g-PS / CV/PET membranlarla fruktoz deriştirilmesinde, brine derişiminin etkisini incelemek için, besleme çözeltisi %10 (m/m) fruktoz, brine %15, %20, %25 (m/m) NaCl çözeltileri kullanıldı. Sonuçlar Şekil 6’de verildi.

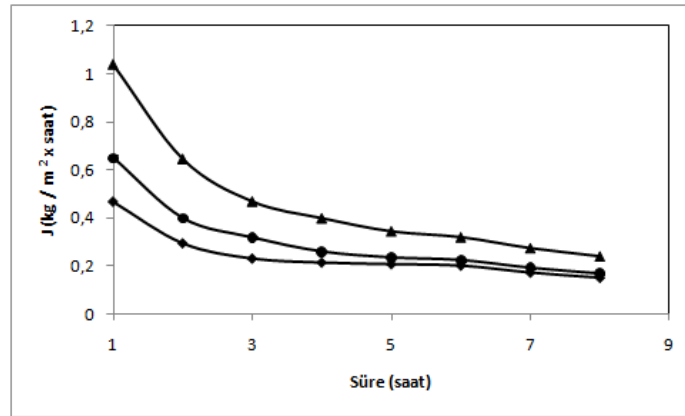


**Şekil 6.** PSf-g-PS/ CV/PET membranlarda brine derişiminin akı üzerine etkisi (Besleme çözeltisi : %10 (m/m) Fruktoz,  $T=30 \pm 1^\circ\text{C}$ , Brine sirkülasyon hızı: 100 rpm, Besleme çözeltisi sirkülasyon hızı: 200 rpm,  $\delta: 60 \pm 5 \mu\text{m}$ )

Şekiller incelendiğinde %20 (m/m) NaCl çözeltisinde akının, %25 (m/m) NaCl çözeltisi kullanıldığında ki akıya yakın olduğu görülmektedir. Brine derişiminin artışı membranın iki tarafında aktivite farkını, dolayısıyla kütle transferini sağlayan yürütücü kuvveti artırmaktadır [24, 25]. Ayrıca, Petrotos ve arkadaşlarına göre [22], brine çözeltisinin fiziksel özellikleri (yoğunluk, vizkozite vb) membranın direnci olan membran kütle transfer katsayısını ve toplam kütle transfer katsayısını etkilediğini düşünmüşlerdir.

### 3.3. Sıcaklığın Akı Üzerine Etkisi (Effect of Temperature on Flux)

PSf-g-PS / CV/PET membranlar ozmotik distilasyonu için tasarlanan hücreye yerleştirildi. Optimize edilmiş koşullarda, besleme çözeltisine brine sıcaklıkları  $30 \pm 1^\circ\text{C}$ ,  $40 \pm 1^\circ\text{C}$ ,  $50 \pm 1^\circ\text{C}$  alınmış sıcaklığın akı üzerine etkisi incelendi. Sonuçlar Şekil 7'de verildi.



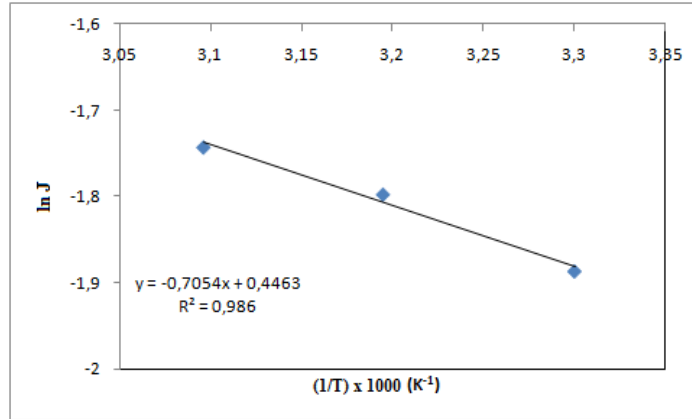
**Şekil 7.** PSf-g-PS / CV/PET membranlarda sıcaklığın akı üzerine etkisi (Besleme çözeltisi: %10 (m/m) Fruktoz, Brine sirkülasyon hızı: 100 rpm, Besleme çözeltisi sirkülasyon hızı: 200 rpm,  $\delta: 60 \pm 5 \mu\text{m}$ , ◆  $30 \pm 1^\circ\text{C}$ , ●  $40 \pm 1^\circ\text{C}$ , ▲  $50 \pm 1^\circ\text{C}$ )

Sıcaklığın artması ile viskozite azalmış, akı artmıştır. Çözelti viskozitelerinin sıcaklıkla değişimi Tablo 3'de verilmiştir.

**Tablo 3.** Sıcaklık artışı ile çözelti viskozitelerinin değişimi

Çözelti	Viskozite ( $\mu$ ) ( $10^{-3}$ Pa.s) (30 °C)	Viskozite ( $\mu$ ) ( $10^{-3}$ Pa.s) (40 °C)	Viskozite ( $\mu$ ) ( $10^{-3}$ Pa.s) (50 °C)
%10(m/m) Fruktoz	0,9488	0,7771	0,6663
%20 (m/m) NaCl	1,1653	0,9857	0,7662

Sıcaklık artışı ile çözelti viskoziteler azalmıştır. Literatürde bunu desteklemektedir [24, 25]. Sıcaklık artışı difüzyon katsayısını artırmaktadır. Sıcaklık aktarım için gerekli olan kinetik enerjiyi sağlamıştır [26- 28]. Wrolstod ve arkadaşları [29], ahududu suyunun deriştirilmesinde sıcaklığın etkisini incelediklerinde, sıcaklık artışının akıyı artırdığını ifade etmişlerdir. Beaudry ve Lampi [30] ise, sıcaklığın artışı ile çözelti viskozitesinin azaldığını ve difüzyon katsayısının artması ile akının arttığını belirtmişlerdir.  $30 \pm 1$  °C,  $40 \pm 1$  °C,  $50 \pm 1$  °C sıcaklıklarında elde edilen akı değerlerinden aktarım aktivasyon enerjisi Eş 5 ile hesaplandı.

**Şekil 8.** PSf-g-PS / CV/PET membranların fruktoz deriştirilmesine ait  $\ln J - 1/T$  grafiği

Şekil8'de  $\ln J$ 'e karşı  $1/T$  grafiğinin eğiminden fruktozun PSf-g-PS / CV/PET membranlarla deriştirilmesinde aktarım aktivasyon enerjisi 5,87 kJ/mol olarak bulundu.

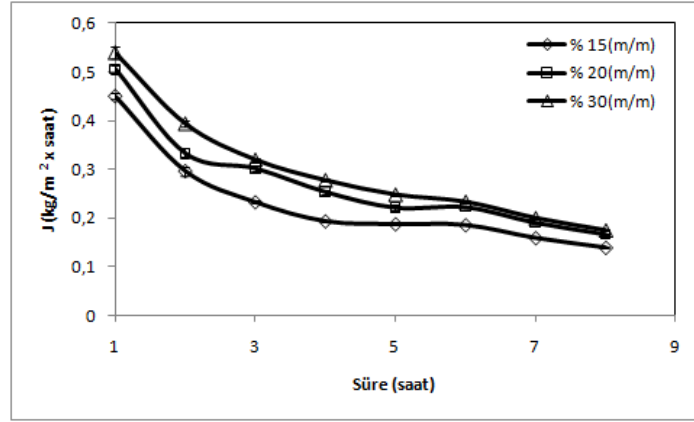
Aktarım aktivasyon enerjisinin düşük çıkması, membrandan suyun aktarımını artırmakta ve yüksek akının elde edilmesine sebep olmaktadır [31,32].

### 3.4. Brine Derişimi ve Çeşidinin Akı Üzerine Etkisi (Effect of Brine Concentration and Type on Flux)

Brine olarak nötr veya neredeyse nötr pH, toksik olmayan, inert özelliklere sahip tuz çözeltileri kullanılmaktadır. Membranla fiziksel veya kimyasal olarak etkileşmemeli, aynı zamanda yüksek ozmotik basınç sağlayan ucuz, kolay tedarik edilen bir tuz olmalıdır. Genel olarak, inorganik tuzlar ( $MgSO_4$ ,  $CaCl_2$ ,  $MgCl_2$  ve  $NaCl$  gibi) ve organik çözücüler (poligliserol ve gliserol gibi) brine çözeltisi olarak kullanılır [33]. Brine çeşidinin akı üzerine etkisini incelemek amacıyla,  $NaCl$ ,  $MgCl_2$  ve  $CaCl_2 \cdot 2H_2O$  tuzlarının farklı derişimlerde hazırlanan çözeltileri kullanıldı.

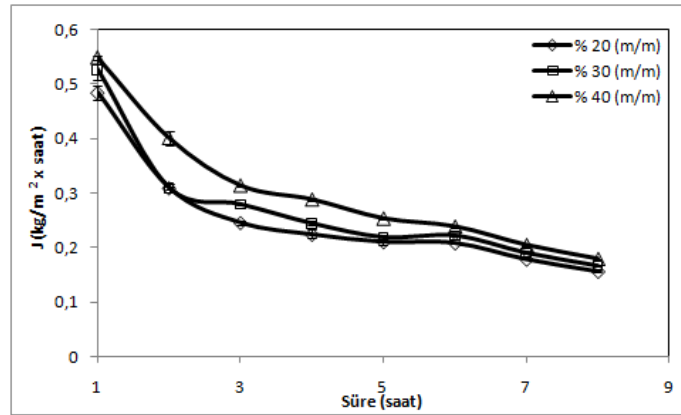
Brine olarak %15, %20, %25 (m/m)  $NaCl$  çözeltilerininakıya etkisi ile elde edilen sonuçlar Şekil 6'da verilmişti. Derişimin artması ile yürütücü kuvvet (buhar basıncı farkı) artmış, dolayısıyla akı artmıştır.

%15, %20, %30 (m/m) (doygunluğa yakın derişim)  $MgCl_2$  çözeltileri kullanılması ile elde edilen sonuçlar Şekil 9'da verilmiştir. Yüksek ozmotik aktiviteye sahip olan  $MgCl_2$  çözeltisinde aktarımın daha fazla olduğu görülmüştür.



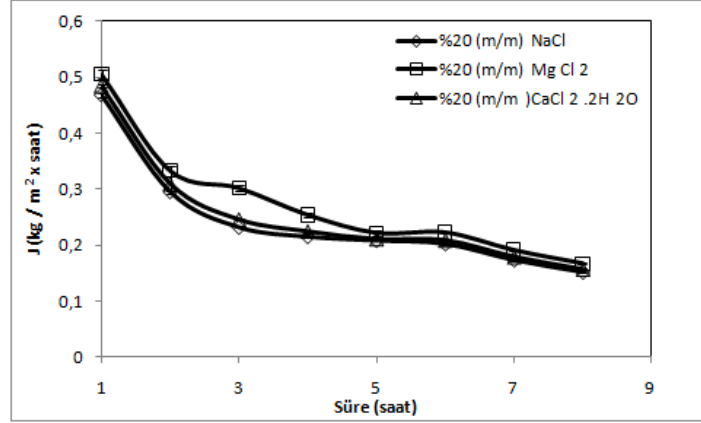
**Şekil 9.** PSf-g-PS / CV/PET membranlarda  $MgCl_2$  derişiminin akı üzerine etkisi (Besleme çözeltisi: %10 (m/m) Fruktoz,  $T=30 \pm 1^\circ C$ , Brine sirkülasyon hızı: 100 rpm, Besleme çözeltisi sirkülasyon hızı: 200 rpm  $\delta$ :  $60 \pm 5 \mu m$ )

%20, %30, %40 (m/m) (doygunluğa yakın derişim)  $CaCl_2 \cdot 2H_2O$  çözeltilerinin kullanılması ile elde edilen sonuçlar ise Şekil 10'da verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi derişimin artışı aktarımı artırmıştır. Bu durum yüksek brine derişimi ile aktarımın artması, membranın iki tarafında bulunan çözeltiler arasında buhar basıncı farkının artmasına atfedilebilir[34].



**Şekil 10.** PSf-g-PS / CV/PET membranlarda  $CaCl_2 \cdot 2H_2O$  derişiminin akı üzerine etkisi (Besleme çözeltisi: %10 (m/m) Fruktoz,  $T=30 \pm 1^\circ C$ , Brine sirkülasyon hızı: 100 rpm, Besleme çözeltisi sirkülasyon hızı: 200 rpm,  $\delta$ :  $60 \pm 5 \mu m$ )

Aynı derişimde farklı brine çeşitlerini kıyaslamak amacıyla, farklı brine çözeltilerinin akı üzerine etkisi Şekil 11'de verilmiştir.



**Şekil 11.** PSf-g-PS/ CV/PET membranlarda Brine çeşidinin akı üzerine etkisi ( Besleme çözeltisi: %10 (m/m) Fruktoz,  $T=30 \pm 1^\circ\text{C}$ , Brine sirkülasyon hızı: 100 rpm, Besleme çözeltisi sirkülasyon hızı: 200 rpm,  $\delta: 60 \pm 5 \mu\text{m}$ )

Ozmotik aktivite farkına sahip olan brine çözeltileri aktarımı da büyük ölçüde etkilemiştir. [35,36]. En yüksek akı seviyesi  $\text{MgCl}_2$  kullanılarak elde edildi. Bu akı artışı,  $\text{MgCl}_2$ 'nin ozmotik aktivitesinin (eşdeğer ağırlığa çözünürlük oranı) diğerlerinden daha iyi olduğu gerçeğine ışık tutan  $\text{NaCl} > \text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} > \text{MgCl}_2$  sırasına göre eşdeğer tuz ağırlıklarındaki artışa bağlanabilir [37]. Zhnag ve arkadaşları ozmotik membran distilasyonunda tuz çözeltilerinin derişimi ve çeşidinin sistem performansı ve akı üzerine etkilerini araştırmışlardır. Çalışmalarında eşdeğer tuz ağırlıklarındaki değişimi  $\text{NaCl} > \text{K}_2\text{CO}_3 > \text{MgCl}_2$  şeklinde olan  $\text{NaCl}$ ,  $\text{K}_2\text{CO}_3$  ve  $\text{MgCl}_2$  tuzlarını kullanmışlar ve en büyük ozmotik aktiviteye sahip  $\text{MgCl}_2$  de en yüksek akıyı elde etmişlerdir[38].

#### 4. SONUÇ (CONCLUSION)

PSf-g-PS/ CV/PET membranlar kullanılarak OD ile fruktozun deriştirilmesinde, besleme çözelti derişiminin artması ile aktarımın azaldığı, brine derişiminin artması ile aktarımın arttığı gözlenmiştir. Besleme ve Brine çözelti derişiminin akıya etkisi incelendiğinde en yüksek akı değerine %10 (m/m) Fruktoz, %20 (m/m)  $\text{NaCl}$  derişimde ulaşılmıştır. Sıcaklığın artması ile akı artmış ve aktarım aktivasyon enerjisi 5,87 kJ/mol olarak bulunmuştur. İncelenen üç brine cinsinden ( $\text{NaCl}$ ,  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  ve  $\text{MgCl}_2$ 'den) ozmotik aktivitesi büyük olan  $\text{MgCl}_2$ 'de en yüksek aktarım elde edilmiştir. Bu çalışma neticesinde OD sistemlerinin avantajlarını gerçekleştirmek için daha ileri çalışmalarda kullanılacak, ince ve sağlam hidrofobik karakterde membranın literatüre kazandırılması söz konusudur.

#### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışma Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi ile gerçekleştirilmiştir.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Homayoonfala M., Akbaria A., Mehrnia M. R. Preparation of polysulfone nanofiltration membranes by UV-assisted grafting polymerization for water softening, *Desalination*, 263 (217-225), (2010).
- [2] Yua H., Caoa Y., Kanga G., Liua J., Lia M., Yuan Q. Enhancing antifouling property of polysulfone ultrafiltration membrane by grafting zwitterionic copolymer via UV-initiated polymerization, *Journal of Membrane Science*, 342 (6-13), (2009).
- [3] Emam H.E., Abdelhamid A.E., Abdalhameed R.M. Refining of liquid fuel from N-Containing compounds via using designed Polysulfone @ Metal organic framework composite film, *Journal of Cleaner Production*, 218 (347-356), (2019).
- [4] Yua W.-W., Lia H.-J., Xiang T., Qina H., Suna S.-D., Zhao C.-S. Grafting of zwitterion from polysulfone membrane via surface-initiated ATRP with enhanced antifouling property and biocompatibility, *Journal of Membrane Science*, 446 (79-91), (2013).

- [5] Yamagishi H., Crivello J.V., Belfort G. Development of a novel photochemical technique for modifying poly (arylsulfone) ultrafiltration membranes, *Journal of Membrane Science*, 105 (237-247), (1995).
- [6] Bilongo T.G., Remigy J.C., Clifton M.J., Modification of hollow fibers by UV surface grafting, *Journal of Membrane Science*, 364 (208-304), (2010).
- [7] Béquet S., Remigy J., Rouch J., Espenan J. From ultrafiltration to nanofiltration hollow fiber membranes: a continuous UV-photografting process, *Desalination* 144 (9-14), (2002).
- [8] Saha N.K., Balakrishnan M., Ulbricht M. Fouling control in sugarcane juice ultrafiltration with surface modified polysulfone and polyethersulfone membranes, *Desalination* 249 (1124-1131), (2009).
- [9] Yamagishi H., Crivello J., Belfort G. Evaluation of photochemically modified poly (aryl sulfone) ultrafiltration membranes, *Journal of Membrane Science*, 105 (249-259), (1995).
- [10] Benkhaya S., Achiou B., Ouammou M., Bennazha J., Younssi S. A., M'rabet S., Harf A. E., Preparation of low-cost composite membrane made of polysulfone/polyetherimide ultrafiltration layer and ceramic pozzolan support for dyes removal, *Materials Today Communications*, 19 (212–219), (2019).
- [11] Filimona A., Dobosa A. M., Musteatab V. New perspectives on development of polysulfones/cellulose derivatives based ionic-exchange membranes: Dielectric response and hemocompatibility study, *Carbohydrate Polymers*, 226 (115300), (2019).
- [12] Emadzadeh D., Lau W.J., Matsuura T., Rahbari-Sisakht M., Ismail A.F. A novel thin film composite forward osmosis membrane prepared from PSf-TiO<sub>2</sub> nanocomposite substrate for water desalination, *Chemical Engineering Journal*, 237 (70–80), (2014).
- [13] Kunz W., Benhabiles A., Ben-Aim, R. Osmotic evaporation through macroporous hydrophobic membranes: a survey of current research and applications, *Journal of Membrane Science*, 121 (25-36), (1996).
- [14] Feng C., Shi B., Li, G., Wu Y. Preparation and properties of microporous membrane from poly(vinylidene fluoride-co-tetrafluoroethylene) (F2.4) for membrane distillation, *Journal of Membrane Science*, 237 (15–24), (2004).
- [15] Lai J. Y., Chen R. Y., Lee K. R. Polyvinyl alcohol  $\gamma$ -ray grafted nylon 4 membrane for pervaporation and evaporation, *Separation Science Technology*, 28 (1437-1452), (1993).
- [16] Rhim J. W., Yoon S. W., Kim S. W., Lee K. H. Pervaporation separation and swelling measurement of acetic acid-water mixtures using crosslinked PVA membranes, *Journal of Applied Polymer Science*, 63 (521-527), (1997).
- [17] Uragami T., Morikawa T. Studies on synthesis and permittivities of special polymer membranes, 70, Permeation and separation characteristics for aqueous alcoholic solutions by evaporation and pervaporation through polystyrene membranes, *Macromolecular Chemistry*, 190 (399), (1989).
- [18] Wang K.Y., Chung T-S., Qin J-J. Polybenzimidazole (PBI) nanofiltration hollow fiber membranes applied in forward osmosis process, *Journal of Membrane Science*, 300 (6-12), (2007).
- [19] Nady N., Franssen M. C. R., Zuilhof H., Eldin M. S. M., Boom R., Schroën K., Modification methods for poly(arylsulfone) membranes: A mini-review focusing on surface modification, *Desalination*, 275 (1–9), (2011).
- [20] Peng M., Li H., Wu L., Zheng Q., Chen Y., Gu W. Porous Poly(Vinylidene Fluoride) Membrane with Highly Hydrophobic Surface, *Journal of Applied Polymer Science*, 98 (1358–1363), (2005).
- [21] Shah P., Murthy C. N. Studies on the porosity control of MWCNT/polysulfone composite membrane and its effect on metal removal, *Journal of Membrane Science*, 437 (90–98), (2013).
- [22] Petrotos K. B., Quantick P., Petropakis H., A study of the direct osmotic concentration of tomato juice in tubular membrane - module configuration. I. The effect of certain basic process parameters on the process performance, *Journal of Membrane Science*, 150 (99-110), (1998).
- [23] Kujawski W., Sobolewska A., Jarzynka K., Güell C., Ferrando M., Warczok J., Application of osmotic membrane distillation process in red grape juice concentration, *Journal of Food Engineering*, 116 (801-808), (2013).
- [24] Onsekizoglu P., Bahceci K. S., Acar J. The use of factorial design for modeling membrane distillation, *Journal of Membrane Science*, 349 (225–230), (2010).
- [25] Wang L., Min J., Modeling and analyses of membrane osmotic distillation using non-equilibrium thermodynamics, *Journal of Membrane Science*, 378 (462–470), (2011).
- [26] Varavuth S., Jiratananon R., Atcharyawut S., Experimental study on dealcoholization of wine by osmotic distillation process, *Separation Purification Technology*, 66 (313–321), (2009).

- [27] Welty J. R., Wicks C. E., Wilson R. E., Rorrer G. L. Fundamentals of momentum, Heat and Mass Transfer, fifth ed., John Wiley and Sons, Hoboken, NJ. P. 711.
- [28] Thanedgunbaworn R., Jiratananon R., Nguyen M.H. Mass and heat transfer analysis in fructose concentration by osmotic distillation process using hollow fibre module, *Journal of Food Engineering*, 78 (126–135), (2007).
- [29] Wrolstad R.E., McDaniel M.R., Durst R.W., Micheals N., Lampi K. A., Beaudry E.G. Composition and sensory characterization of red raspberry juice concentrated by direct-osmosis or evaporation, *Journal of Food Science*, 58 (633-637), (1993).
- [30] Beaudry E. G., Lampi K. A. Osmotic concentration of fruit juices, *Flussiges Obst*, 57 (652-656; 663-664), (1990).
- [31] Asman G., Şanlı O., Tuncel D., pH- and Temperature-Sensitive In Vitro Release of Salicylic Acid through Poly(vinyl alcohol-g-acrylamide) Membranes, *Journal of Applied Polymer Science*, 107 (3005–3012), (2008).
- [32] Prince J.A., Rana D., Singh G., Matsuura T., Jun Kai T., Shanmugasundaram T.S. Effect of Hydrophobic Surface Modifying Macromolecules on Differently Produced PVDF Membranes for Direct Contact Membrane Distillation, *Chemical Engineering Journal*, 242 (387-396), (2013).
- [33] Alves, V.D., Coeihoso, I.M. Mass transfer in osmotic evaporation: effect of process parameters, *Journal of Membrane Science*, 208 (171-179), (2002).
- [34] Petrotos, K. B., Quantick, P., Petropakis, H., A study of the direct osmotic concentration of tomato juice in tubular membrane - module configuration. I. The effect of certain basic process parameters on the process performance, *Journal of Membrane Science*, 150 (99-110), (1998).
- [35] Ge Q., Ling M., Chung T.-S. Draw solutions for forward osmosis processes: Developments, challenges, and prospects for the future, *Journal of Membrane Science*, 442 (225–237), (2013).
- [36] Tan C. H., Ng H. Y. A novel hybrid forward osmosis–nanofiltration (FO–NF) process for sea water desalination: draw solution selection and system configuration, *Desalination Water Treatment*, 13 (356–361), (2010).
- [37] Narayan A .V., Nagaraj N., Hebbaf H. U., Chakkaravarthi A., Raghavaraoa K.S.M.S., Nene S. Acoustic field-assisted osmotic membrane distillation, *Desalination*, 147 (149-156), (2002).
- [38] Zhang Z., Chen G. Q., Hu B., Denga H., Feng L., Zhang S. The role of osmotic agent in water flux enhancement during osmotic membrane distillation (OMD) for treatment of highly saline brines, *Desalination*, 481 (114353) (2020).



## CULuT: Improving channel utilization with Look-up Table in WLANs

 Hacı Bayram KARAKURT<sup>1</sup>  Cemal KOÇAK<sup>2,\*</sup> 
<sup>1</sup> Mustafa Kemal Street 2120 Street. No:39 HAVELSAN, P. 06510, Çankaya/ANKARA

<sup>2</sup>Gazi University Faculty of Technology, Department of Computer Engineering, 06500, Yenimahalle/ANKARA

### Graphical/Tabular Abstract

#### Article Info:

Research article

Received: 23/03/2020

Revision: 26/06/2020

Accepted: 03/07/2020

#### Highlights

- RTSV.
- FTV.
- Riverbed Modeler.

#### Keywords

WLAN

Look-up table

Channel utilization

Fragmentation threshold

In this study, RTSV, FTV and BS values were updated using the Brute Force algorithm in with the Look-up Table on the code block structure of the Riverbed Modeler and the Channel Utilization increased at the time of simulation. With this new agent model structure, the network layer, node layer and process layer have been updated and Channel Utilization has been increased by 15% -18%.

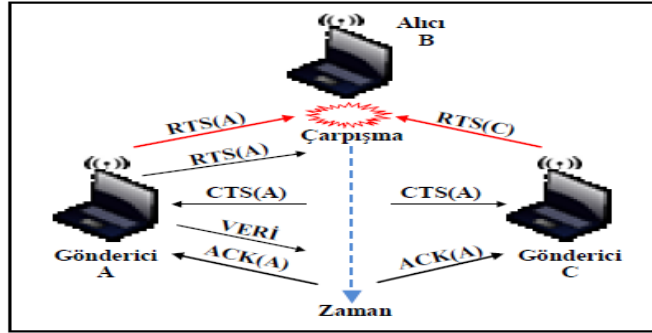


Figure A. Collision in RTS / CTS mechanism

**Purpose:** In this study, with a brute force algorithm with feedback loop table in order to maximize channel efficiency with RTSV, FTV and BS are used for transmitting data in 802.11e CSMA/CA protocol in WLANs. In the studies main goal is improving performance with the most appropriate input values for the parameters used in the channel usage situation.

**Theory and Methods:** In this model, while the input parameters (RSTV, FTV, BS) are initially at their default values, these input values are controlled by the output parameter embedded in the code each time, and if they are not at their ideal value, they repeat the cycle. For example, the values at the beginning are controlled by the network layer, then the node layer and then in the process model layer in comparison with the control output parameters in the relevant code area (agent). If the value is not ideal, the cycle continues with the agent again in the Riverbed Modeler process (environment).

**Results:** With this new agent model structure, the network layer, node layer and process layer have been updated and Channel Utilization has been increased by 15% -18%.

**Conclusion:** In this study, the output parameter of RTSV, FTV and BS input parameters, which is the output parameter of the channel usage situation, was increased in the simulation study. In this dynamic structure, the ideal channel usage situation is provided by using the brute force algorithm and the loop table. A new agent structure is used in this new method. RTSV, FTV and BS input values are cyclically updated in the "Wlan\_mac.pr.m" code block located at the bottom layer, and control is provided at network layer, node layer and process layer respectively. All scenarios in the loop table were tested with feedback until the channel usage situation became ideal. With this method, a dynamic update was provided and the channel usage situation was increased by 15% -18%.

GU J Sci, Part C, 8(3): 542-560 (2020)



Gazi Üniversitesi

**Fen Bilimleri Dergisi**  
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ


<http://dergipark.gov.tr/gujsc>

## Kablosuz Yerel Alan Ağlarında Kanal Kullanımının MAC Katmanında Döngü Tablosu ile Artırılması

Hacı Bayram KARAKURT<sup>1</sup> Cemal KOÇAK<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup> Mustafa Kemal Mahallesi 2120 Cad.. No:39 HAVELSAN, P. 06510, Çankaya/ANKARA

<sup>2</sup> Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü P. 06500, Yenimahalle/ANKARA

### Öz

Kablosuz yerel alan ağlarında (Wireless Local Area Network-WLAN) kanal verimliliği performans için büyük önem taşımaktadır. Kanal verimliliğini artıran en önemli parametrelerden biri de kanal kullanım oranı (Channel Utilization-CU) parametresidir. Geleneksel noktadan noktaya kablosuz iletişimde kanal kullanımı, ortama erişim (Medium Access Control- MAC) katmanında hizmet kalitesi (Quality of Service-QoS) performansını arttırmaktadır. WLAN iletişimde kanal kullanımını arttırmaya yönelik önemli çalışmalar yapılmıştır. WLAN'larda kanal kullanım durumunu arttırmak için birçok giriş parametresi bulunmaktadır. Özellikle Çarpışmadan kaçınma ile taşıyıcı algılamalı çoklu erişim (Carrier-sense Multiple Access with Collision Avoidance CSMA/CA) protokolünde kullanılan ve RTS ile CTS sanal paketlerinin kullanımı ve hareketlerini kontrol eden RTS Eşik Değeri (Request to Send Threshold-RTSED), Parçalama Eşik Değeri (Fragmentation Threshold-PED) ve Arabellek Boyutu (Buffer Size-AB) kanal kullanımını arttırmak için kullanılan en önemli parametrelerdir. Yapılan çalışmalarda bu parametreler OPNET Modeller üzerinden test edilip veri setleri elde edilmiştir. Elde edilen veri setleri üzerinden pekiştirmeli öğrenme ile çıkış parametrelerinde performans artışı sağlanmıştır. Yapılan bu çalışmada, RTSED, PED ve AB değerleri ile OPNET Modeller'in kod blok yapısı üzerindeki Döngü Tablosunda (Look-up Table) kaba kuvvet (brute force) algoritması kullanılmıştır. Yapılan güncellemeler ve ajan yapısı ile ağ katmanı, düğüm katmanı ve işlem katmanı güncellenmiştir. Gerçekleştirilen benzetim çalışmaları sayesinde pekiştirmeli öğrenme ile kanal kullanım durumu ortalama %10'dan %15-%18'e çıkartılarak performans artırılmıştır

### Makale Bilgisi

Araştırma makalesi  
Başvuru: 23/03/2020  
Düzeltilme: 26/06/2020  
Kabul: 03/07/2020

### Anahtar Kelimeler

Kablosuz yerel alan ağları  
Döngü tablosu  
Kanal kullanımı  
Parçalama eşik değeri

### Keywords

WLAN  
Look-up table  
Channel utilization  
Fragmentation threshold

## CULuT: Improving channel utilization with Look-up Table in WLANs

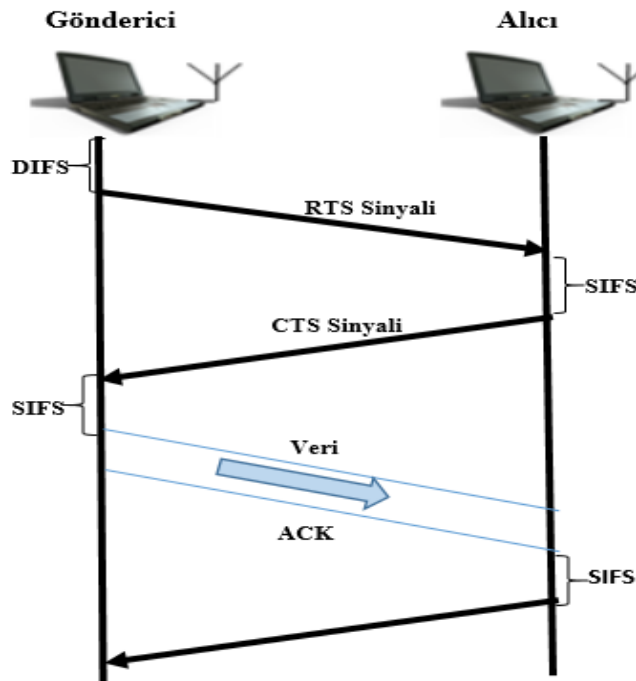
### Abstract

Channel efficiency in wireless local area networks (WLAN) is crucial for performance. One of the most important parameters that increase channel efficiency is channel utilization (CU). Channel Utilization has an important function to increase the Quality of Service (QoS) in the medium access control (MAC) layer of wireless local area networks (WLAN). There are many input parameters to measure the channel utilization in WLANs. Most popular input parameters, Request to Send Threshold (RTS Threshold-RTSTV), Fragmentation Threshold (FTV) and Buffer Size (BS) controls the usage and movement of RTS and CTS virtual packets used in CSMA/CA (Carrier-sense Multiple Access with Collision Avoidance) protocol to increase Channel Utilization. In previous studies, these parameters were tested on OPNET Modeller and datasets were obtained. Performance is increased in the output parameters by applying reinforcement learning over the obtained datasets. In this study, RTSTV, FTV and BS values were updated using the brute force algorithm in with the Look-up Table on the code block structure of the OPNET Modeller and the Channel Utilization increased at the time of simulation. With this new agent model structure, the network layer, node layer and process layer have been updated. With this simulation study, CU and performance has been increased with reinforcement learning from %10 to 15% -18%.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

WLAN’larda Dağıtık Koordinasyon Fonksiyonunda (Distributed Coordination Function-DCF) kullanılan CSMA/CA protokolünde QoS’i artırmak için farklı algoritmalar kullanılarak birçok çalışma gerçekleştirilmiştir [1-3]. Yapılan bu çalışmalarda alınan ve gönderilen veri trafiği, birim zamanda işlenen paket miktarı ve gecikme süresi gibi çıkış parametreleri optimize edilmiştir [4-6]. Bu parametreleri optimize etmek amacıyla farklı RTSED, PED ve AB değerleri OPNET Modeller üzerinden testler koşulmuş ve veri setleri oluşturulmuştur. Daha önce yapılan çalışmalarda Bulanık Mantık ve YSA algoritmaları kullanılmış ve çıkış parametreleri optimize edilmiştir [7-8].

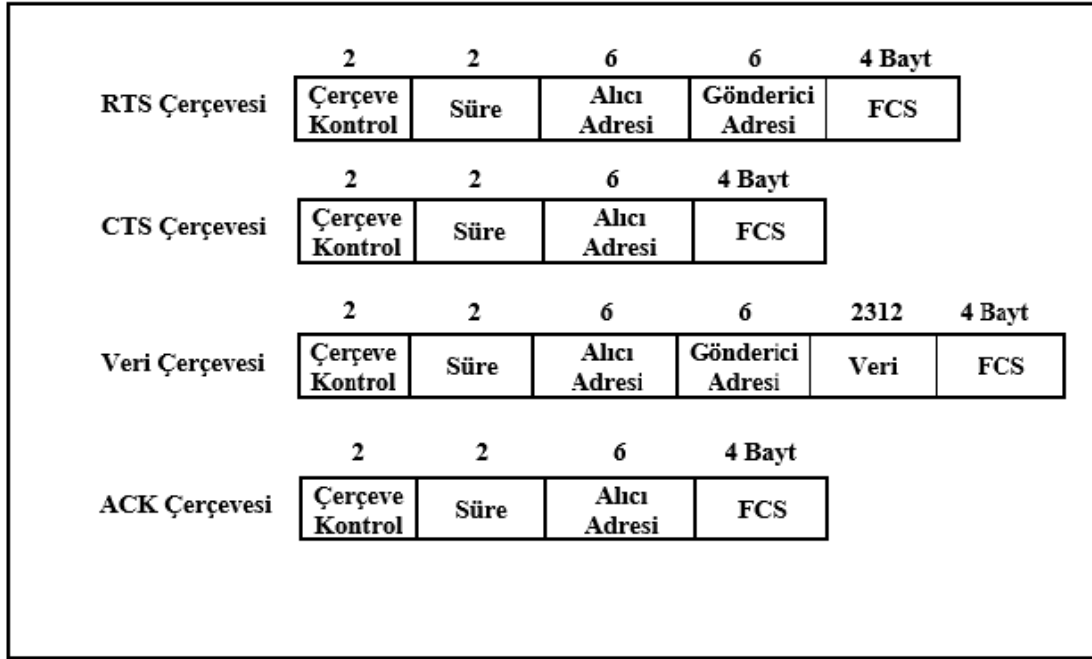
Bant genişliğinin kullanım etkinliği kanal kullanım verimliliği olarak bilinmektedir. Örneğin, çıkış 100 Mbit/s Ethernet bağlantısı 75 Mbit/s ise, kanal verimliliği %75’dir. WLAN’larda kanal kullanım durumu ne kadar yüksek olursa QoS o kadar yüksek çıkmaktadır. Bu durum kanal kullanım verimliliğini artırmaktadır [9]. CSMA/CA protokolünde yer alan Dağıtım Çerçeve Boşluğu (Distribution Inter Frame Space-DIFS) ve Kısa Çerçeve Boşluğu (Short Inter-Frame Space-SIFS) süreleri ağdaki kanalın kullanım durumu için beklenen sürelerdir [Şekil 1]. Bu süreler RTS ve CTS sanal paketlerinin kullanılması için senkronize olarak çalışmaktadır [10-12]. Gönderme İsteği (Request to Send-RTS) ve Gönderme İsteği Cevabı (Clear to Send-CTS) paketleri ağlarda çarpışmayı azaltmaktadır ancak bu paketlerin her zaman kullanılması ağlarda zaman ve enerji kayıplarına sebep olmaktadır. RTSED değeri CSMA/CA protokolünün dolayısıyla da RTS ve CTS paketlerinin ne zaman aktive edileceğini belirlemektedir. PED değeri ise bu protokole belirli büyüklüğün üzerinde yer alan verilerin ne zaman ve hangi büyüklükte parçalanacağını belirlemektedir [13-15]. CSMA/CA yönteminin aktif olarak kullanılabilmesi için gelen verinin boyutunun RTSED’den büyük olması gerekmektedir. RTS/CTS sanal paketlerinin kullanılması esnasında kullanılacak enerji nedeniyle CSMA/CA protokolünün aktif edilip edilmemesi bu eşik değeri ile belirlenmektedir. Saklı düğüm problemlerinde uygun RTSED’ler seçilmediğinde ağda gizli düğüm problemi ortaya çıkmakta ve sistem boşa düşmektedir [16-17].



Şekil 1. RTS/CTS mekanizmasında çarpışma

IEEE 802.11 DCF yapısında genel olarak RTS çerçeve yapısı, CTS çerçeve yapısı, veri çerçeve yapısı ve ACK (Acknowledgement) çerçeve yapıları bulunmaktadır. Bu çerçeve yapıları yönetim, veri ve kontrol olarak 3’e ayrılmaktadır. Kontrol çerçeveleri RTS ve CTS 20’şer bayt, ACK ise 14 bayt olarak yer almaktadır. Bu çerçevelerde yer alan “Frame Control” alanındaki tip başlığı alt alanı çerçevenin hangi tip

olduğu bilgisi tutulmaktadır [Şekil 2]. Ağda veri iletimi esnasında veri çerçevesinin boyutu RTS'den büyük olduğu durumda RTS çerçevesi gönderilmekte ve CTS çerçevesinin dönüşü sağlanmaktadır. CTS çerçevesi geldikten sonra veri çerçevesi gönderilmektedir. ACK çerçevesi alındıktan sonra veri akışının doğru şekilde sağlandığı teyit edilmektedir. Bu mekanizmanın kullanılması ile ağlarda çarpışmalar önlenmekte ve gizli düğüm problemi de ortadan kalkmaktadır [18]. RTS ve CTS sinyalleri 20'şer bayt olduğu için veri çerçevelerine göre çok daha küçük boyutta olup, çarpışmalara sebep olmamaktadır. FCS (Frame Check Sequence-4 bayt) ile de çerçeve kontrol sırası etiketlenmektedir.



Şekil 2. CSMA/CA çerçevelerinin genel içyapıları [19]

Sanal RTS ve CTS sanal paketleri ağda çok fazla gidiş ve gelişlere sebebiyet verdiğinden bir enerji kaybına yol açmaktadır. Bu nedenle bu RTS/CTS mekanizmasının kullanılıp kullanılmayacağına karar veren veri boyutu değeri RTS eşik değeridir. Bazı durumlarda ise RTS ve CTS sanal paketlerinden zaten daha düşük verilerin gelmesi halinde RTS/CTS mekanizması aktif olmamaktadır. Bu nedenle RTS eşik değerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bütün senaryolarda çıkış parametrelerinde farklı performansların oluşması nedeniyle RTS/CTS'nin ideal değerlerinin bulunması gerekliliği bulunmaktadır.

WLAN'larda kanal kullanım oranını artırmak birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Yapılan bu çalışmalarda ses iletişimi serpiştirme tekniği ile kanal kullanım oranı iki kattan fazla artırılmıştır [20]. Yapılan başka bir çalışmada ise IEEE 802.11ac'lerde kanal kullanımı yeni bir tasarım olan PHY-MAC ile %75 oranında artırılmıştır [21]. Başka bir çalışmada da dinamik arabellek boyutu ve grafik teorisi ile "en kötü durum zaman karmaşıklığı" kullanılıp kanal kullanım oranı artırılmıştır [22]. Benzer çalışmalar çarpışma sayısını azaltarak ve farklı kural tabanlı iletişim metotları uygulanarak da gerçekleştirilmiştir [23-24].

Pekiştirmeli Öğrenme ile kablolu ve kablosuz ağlarda birçok problemin çözümü gerçekleştirilmiştir. Örneğin yapılan bir çalışmada Deep-reinforcement Learning Multiple Access (DLMA) adı verilen aynı kablosuz ortamda ve farklı MAC protokollerini senkronize olarak çalıştırmak için pekiştirmeli öğrenme kullanılmıştır. Bu yöntemde pekiştirmeli öğrenme cihazın çalıştırılma yöntemini bilmemektedir. DLMA'nın hedefi ideal bir kanal belirlemektir. Burada amaç toplam verimi artırmaktır ve bu nedenle farklı protokollerin ne zaman çalışacağını deneme-yanılma yöntemi ile belirlemiştir [25]. Yapılan başka bir çalışmada ise kablosuz ağlarda video uygulamalarında servis kalitesini artırmak için önceliklendirme yapılması adına pekiştirmeli öğrenme kullanılmıştır. Geliştirilen yeni yaklaşımda kullanıcılara kablosuz

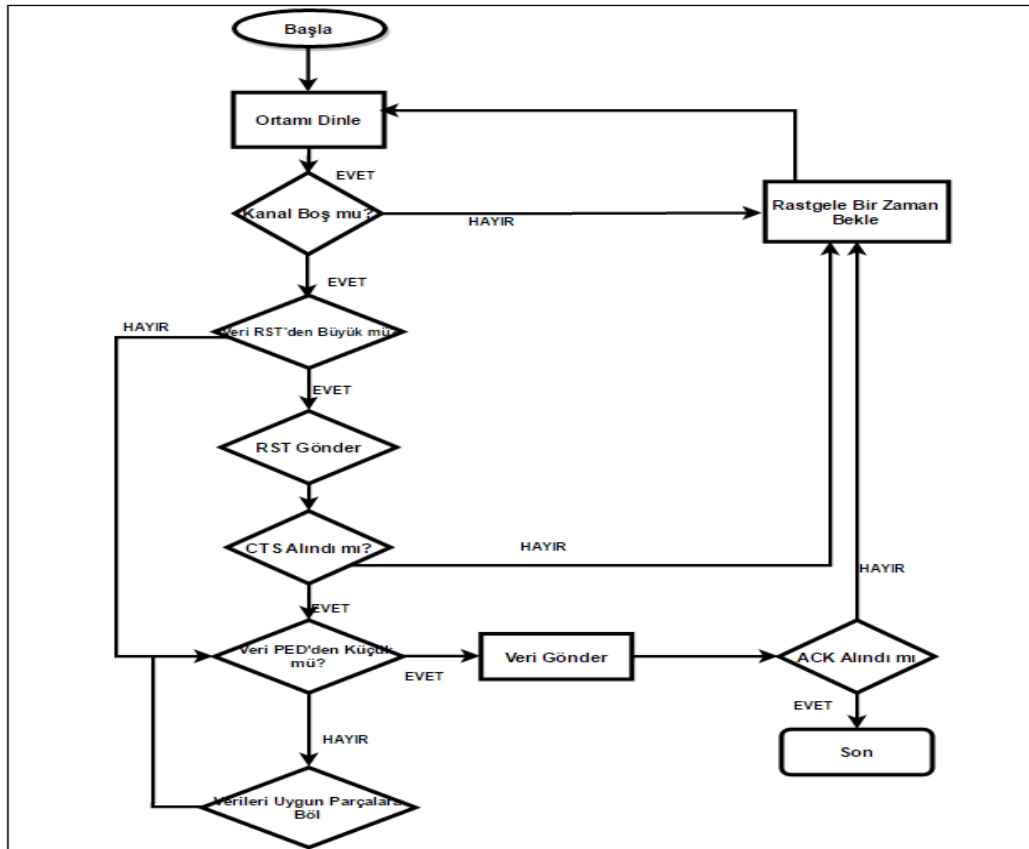
bağlantılarda video uygulamalarının daha hızlı yüklenmesi için mevcut algoritmalar yerine kullanıcı deneyimini pekiştirmeli öğrenme ile optimize edip daha yüksek servis kalitesi sunulmuştur [26].

Kaba kuvvet algoritması, doğrusal basit bir arama ile ideal sonuçları bulan köklü geçmişi bulunan bir algoritmadır. Bu algoritma maliyet açısından hesaplı olduğu için donanım ağırlıklı sistemlerde tercih edilmeye devam etmektedir. Bu algoritma ile basitçe birçok problem çözülebilmektedir. Örneğin yapılan bir çalışmada akıllı kart ile anahtar güncellemeli DES algoritmasıyla kaba kuvvet algoritması kullanılarak üst seviye güvenlik sağlanmıştır [27]. Kaba kuvvet algoritmasının en önemli işlevlerinden bir tanesi hızlıca arama yapabilmesidir.

Yapılan bu çalışmada, WLAN'larda 802.11e CSMA/CA protokolünde verilerin iletilmesinde kanal verimliliğinin maksimum olması için uygun RTS/ED, PED ve AB parametreleri döngü tablosu ile geri beslemeli olarak kaba kuvvet algoritması ile optimize edilmiştir. Gerçekleştirilen çalışmalarda kanal kullanım durumu kullanılan parametreler için en uygun değerler belirlenerek kanal kullanım durumu ortalama %10'dan %15-%18'e kadar arttırılmıştır.

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

CSMA/CA protokolünün aktif olabilmesi RTS/ED'in ideal ve PED değerinin ise yeterli büyüklükte seçilmesi gerekmektedir. PED'den büyük değerlerin olması halinde veriler uygun parçalara bölünmektedir. Sonrasında veri akışı CSMA/CA protokolünün standartlarına göre devam etmektedir. Bu amaçla kullanılan yeni yöntemdeki akış şeması Şekil 3'de gösterilmiştir.

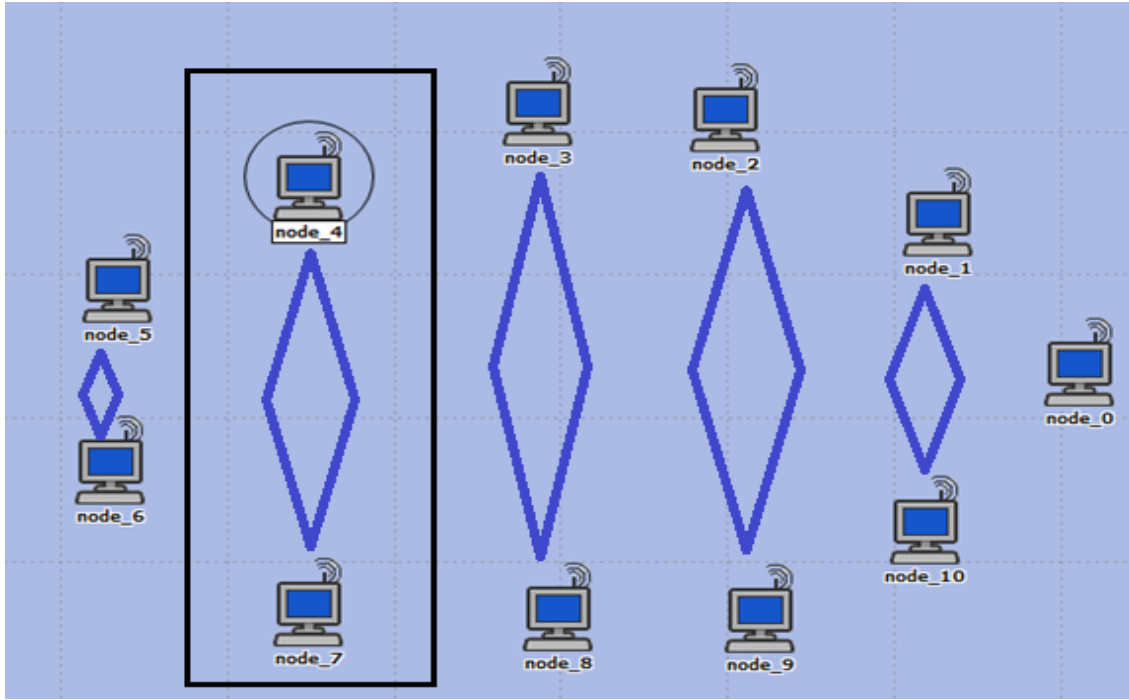


Şekil 3. Temel ve RTS/CTS erişim metotları [8]

Bu çalışmada, WLAN'larda CSMA modelinde veri iletimi esnasında kanal kullanım verimliliğinin döngü tablosu ile artışı amaçlanmaktadır. Çıkış parametreleri olarak kullanılacak olan kanal kullanım durumunun maksimum olması hedeflenmektedir.

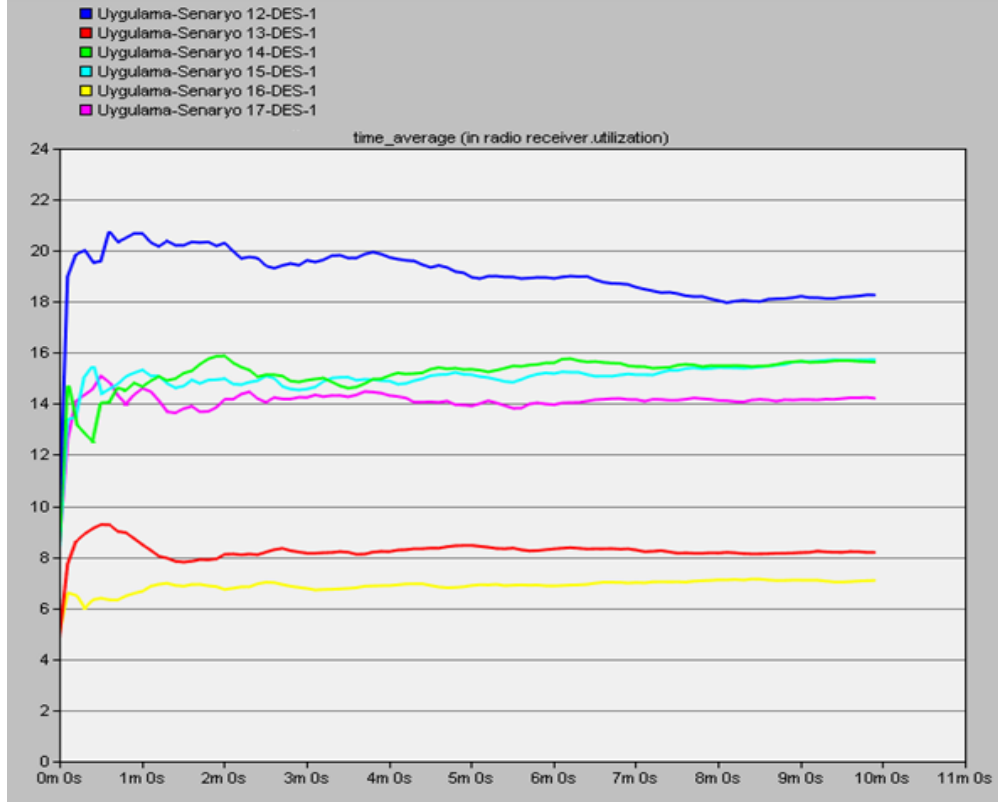
Benzetim test çalışmalarında Şekil 4'de görüldüğü gibi 11 adet düğüm kullanılmıştır. Düğüm yerleşiminde her bir düğüm için hedef düğüm simetrik düğüm geometrik olarak tam karşıya gelen düğüm seçilmiştir. Bu

düğüm 4 ve düğüm 7 arasındaki kanal kullanım durumu analiz edilerek döngü tablosuna sokulmuştur. Node\_0 düğümü erişim noktası (access point) olarak kullanılmıştır.

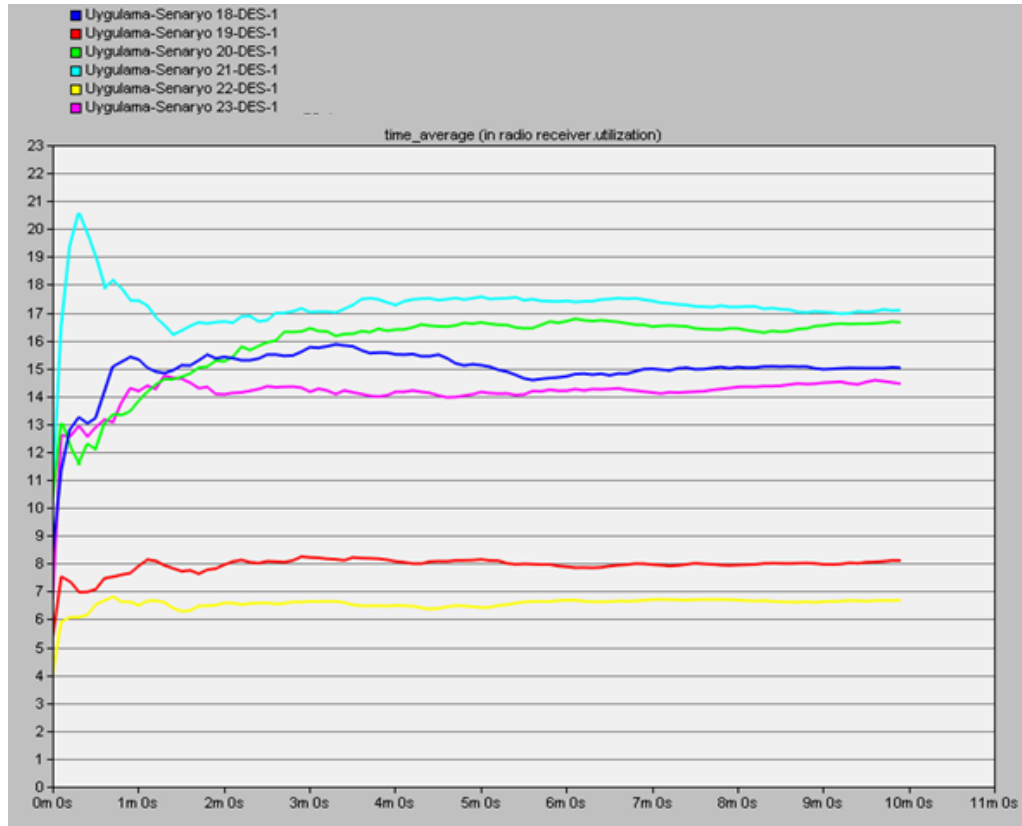


**Şekil 4.** Hedef düğümlerin yerleşimi

Yapılan test sonuçları incelendiğinde kanal kullanım durumu RTSED, PED ve AB'ye bağlı olarak %5,83 ile %20,28 arasında değişmektedir. Bu test sonuçları OPNET Modeller'da 18,900,344 olay ve 125 farklı konfigürasyonda toplam ortalama olay sayısı  $125 \times 18.900.344 = 2.362.543.000$  (İki milyar üç yüz altmış üç bin beş yüz kırk üç) olmak üzere elde edilmiştir. Elde edilen bu değerler diziye aktarılmış ve döngü pekiştirmeli öğrenmeye sokulmuştur. Kanal kullanım durumu için evrensel küme de giriş parametreleri; RTSED ve PED 600 bayt ve 1200 bayt arasında, AB ise 9000 bit ile 15000 bit arasında seçilmiştir [Tablo 1]. Bu seçim yapılırken OPNET Modeller'de gerçekleştirilen test çalışmalarında ve olayların sonunca elde edilen klasik sonuçlardan faydalanılmıştır. Klasik test sonuçlarında bazıları Şekil 5 ve Şekil 6'da yer almaktadır.



Şekil 5. Kanal kullanım durumu klasik test sonuçları-1



Şekil 6. Kanal kullanım durumu klasik test sonuçları-2

**Tablo 1.** Giriş ve çıkış parametreleri ortalama test sonuçları

Senaryo	RTSED (bayt)	PED (bayt)	AB (bits)	Utilization-Kanal Kullanım Durumu (%)
1~125	600-1200	600-1200	9000-15000	5.83-20.28

Kanal kullanım durumunu ölçmek amacı ile RTSED ve PED değerleri 600 bayt, 700 bayt, 900 bayt, 1000 bayt ve 1200 bayt değerleri ile test edilirken, AB 9000 bit, 10000 bit, 12000 bit, 13000 bit ve 15000 bit değerleri ile test edilmiştir. Bu test aşamasında kanal verimliliğini artırmak için evrensel kümede yer alan her bir değer test edilmiştir. Bütün bu değerlerden farklı testlerin seçimi ve kanal kullanım durumu çıktısı Tablo 2’de yer almaktadır.

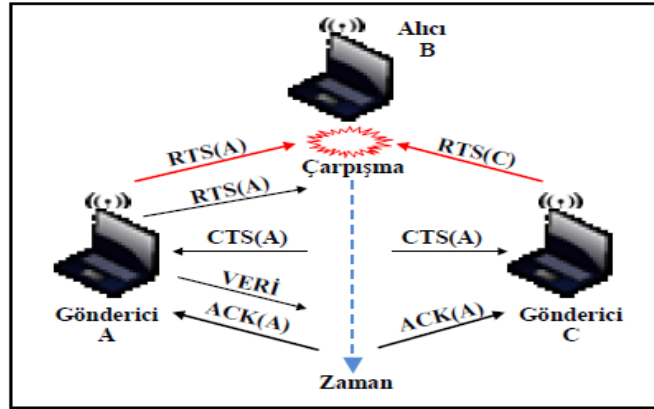
**Tablo 2.** Örnek giriş ve çıkış değerleri

TESTLER	RTSED (bayt)	PED (bayt)	AB (bits)	Utilization Kanal Kullanım Durumu (%)
1	600	600	9000	10,75
3	600	600	12000	19,6
4	600	600	13000	20,28
5	600	600	15000	19,45
6	600	700	9000	10,25
7	600	700	10000	12,8
8	600	700	12000	19,029
9	600	700	13000	19,02
10	600	700	15000	18,33
20	600	1000	15000	16,65
30	700	600	15000	20,07
40	700	900	15000	16,8
50	700	1200	15000	15,61
60	900	700	15000	17,35
70	900	1000	15000	15,06
80	1000	600	15000	18,03
90	1000	900	15000	15,58
100	1000	1200	15000	13,9
110	1200	700	15000	15,77
120	1200	1000	15000	14,06
125	1200	1200	15000	13,29

## 2.1. RTS Eşik Değeri (RTS Threshold Value)

CSMA/CA protokolünde bazen iki düğüm arasında, bazen ise ikiden fazla düğüm arası çarpışmalar yaşanmakta ve gizli düğüm problemi ortaya çıkmaktadır [Şekil 7]. CSMA/CA protokolünde QoS’i artırmak ve IEEE 802.11e’nin MAC katmanında CSMA/CA’yı aktif etmek için kullanılan RTSED, DIFS, SIFS ve ACK parametrelerini direk etkilemiş ve performansın artırılmasına katkı sağlamıştır [28-29].

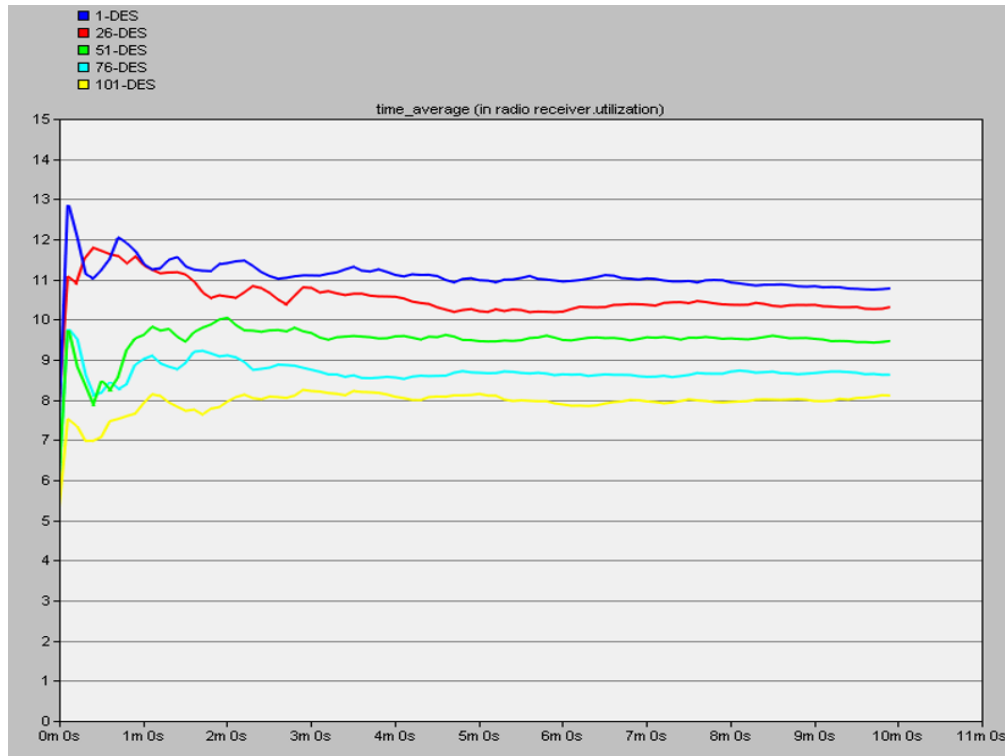




Şekil 7. RTS/CTS mekanizmasında çarpışma [6]

RTSED değeri ideal olarak seçildiğinde, düğümler tarafından aynı anda gönderilen çerçevelerin çarpışmasını önleyerek, gizli düğüm problemi çözülecek ve kanal kullanım durumunu artırılabilecektir [30].

Yapılan test çalışmalarında Şekil 8’de görüldüğü gibi OPNET Modeller benzetim aracında elde edilen kanal kullanım durumu sonuçları, RTSED giriş değişkeni için 600 bayt ile 1200 bayt arasında düzenli olarak azalmaktadır.

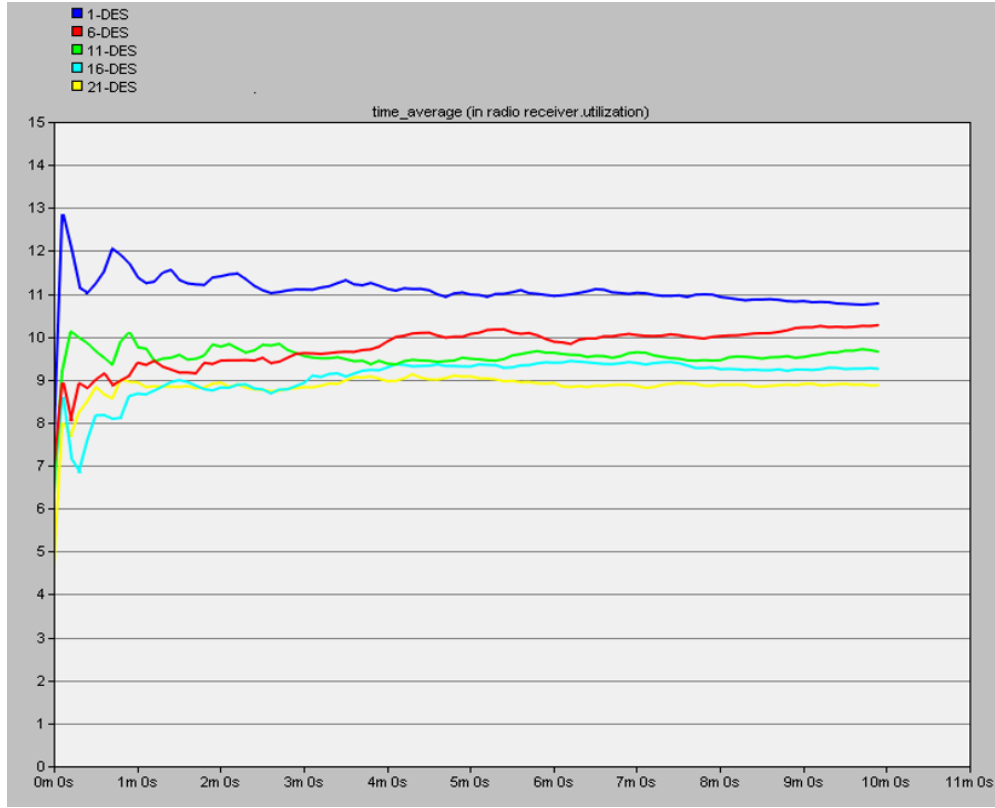


Şekil 8. RTSED için örnek alıcı kanal kullanım durumu performans karşılaştırması

## 2.2. Parçalama Eşik Değeri (Fragmentation Threshold value)

WLAN’larda CSMA/CA protokolünde veriler hedef düğüme iletilirken parçalara ayrılarak iletilmektedir [31-32]. Bu parçaların bölünebileceği eşik değeri PED giriş değeri ile belirlenmektedir. OPNET Modeller benzetim aracı kullanılarak PED’lerin ölçülmesi için yapılan test çalışmalarında literatürde gerçekleştirilen test çalışmaları göz önünde bulundurularak evrensel kümede 600-700-900-1000-1200 bayt seçilmiştir.

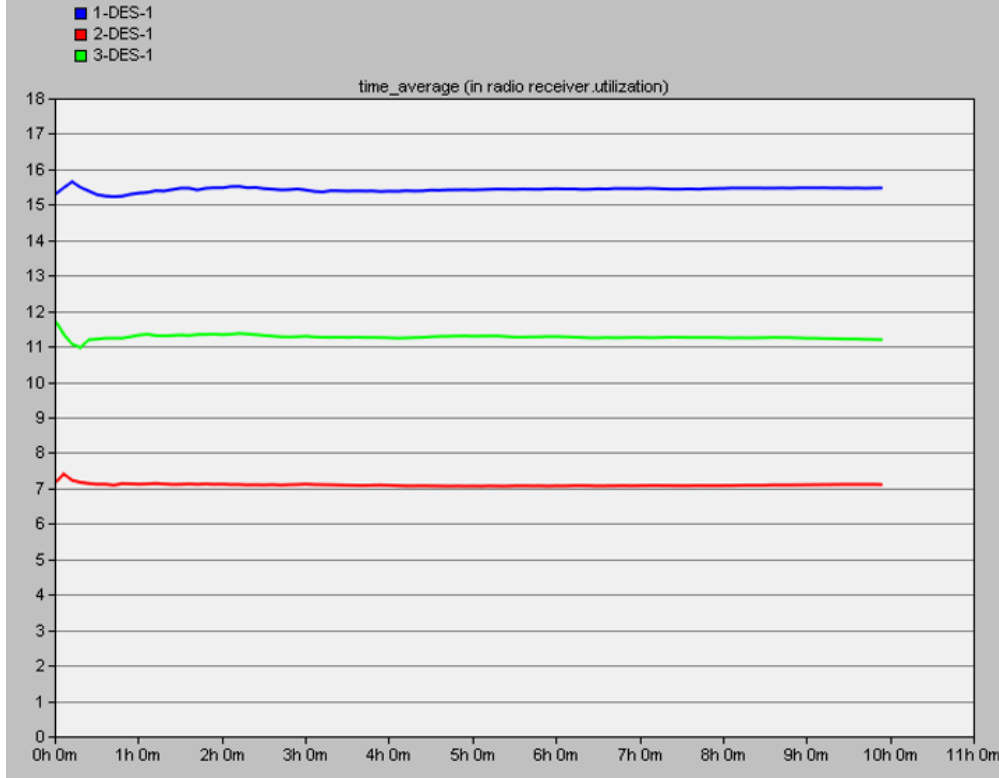
Şekil 9’da görüldüğü gibi kanal kullanım durumu alıcı PED giriş değişkeni için 600 bayt ile 1200 bayt arasında düzenli olarak azalmaktadır.



Şekil 9. PED için örnek alıcı kanal kullanım durumu performans karşılaştırması

### 2.3. Arabellek Boyutu (Buffer Size)

WLAN’larda sabit arabellek boyutları kullanıldığı için kanalın tam zamanlı kullanma verimliliğinin, yani ağın performansının düşmesine neden olmaktadır. OPNET Modeller benzetim aracı kullanılarak AB değerinin ölçülmesi için yapılan testlerde evrensel kümede AB değerleri; 9000-10000-12000-13000-15000 bit seçilerek alıcı için kanal kullanım durumu ölçülmüştür. Bu değerler belirlenirken klasik test sonuçları ve literatürden faydalanılmıştır. Şekil 10’da görüleceği gibi alıcı kanal kullanım durumu için AB 9000 bit ile 12000 bit arasında azalmakta iken, 12000 bit ile 15000 bit arasında ise artmaktadır.

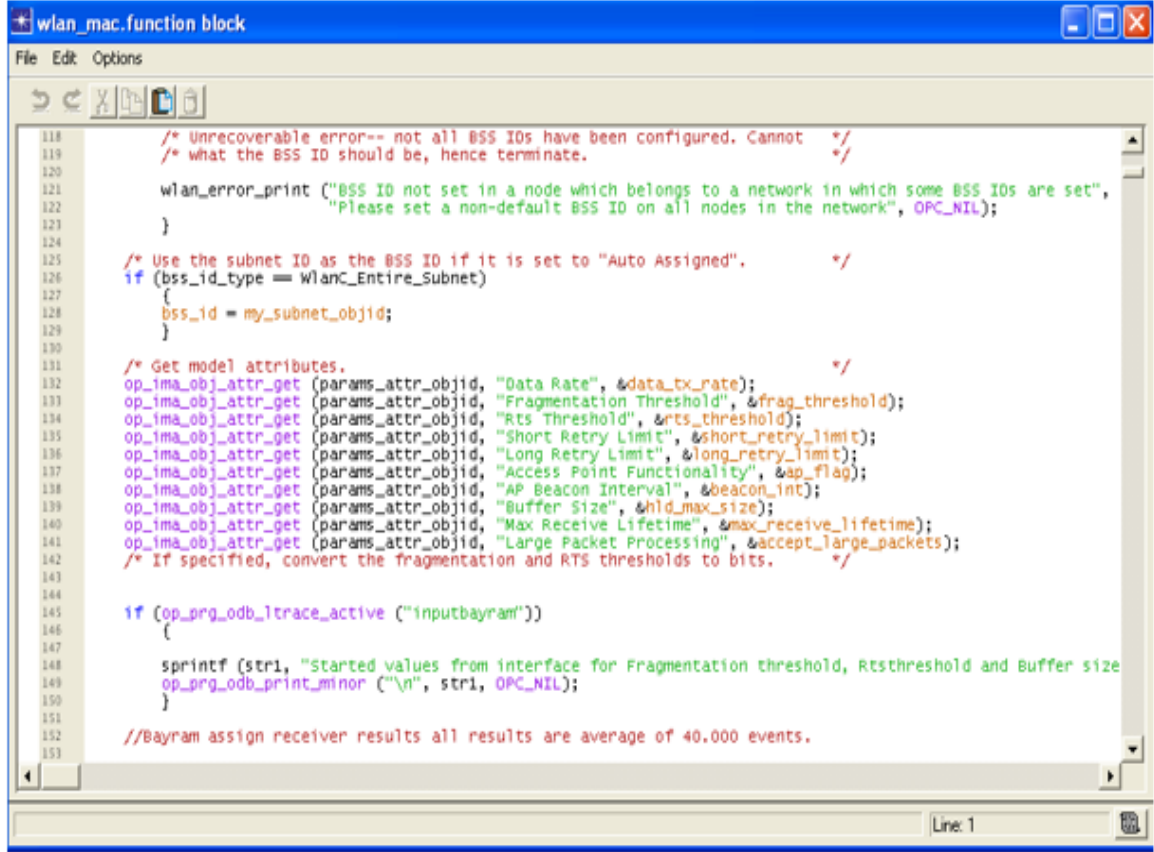


*Şekil 10. AB için örnek alıcı kanal kullanım durumu performans karşılaştırması*

### 3. OPTİMUM PARAMETRELERİN DÖNGÜ TABLOSU İLE BELİRLENMESİ (DETERMINATION OF OPTIMUM PARAMETERS BY LOOK-UP TABLE TABLE)

WLAN'larda gerçekleştirilen önceki çalışmalarda gecikme süresi, birim zamanda işlenen miktarı gibi çıkış parametrelerini optimize etmek amacıyla OPNET Modeller üzerinden elde edilen veri setleri için farklı algoritmalar kullanılarak giriş değişkenleri optimize edilmiştir. Yapılan bu çalışmada ise ilk olarak simülasyonda koşum anında kaba kuvvet algoritması ile pekiştirmeli öğrenme metodu ile OPNET'in kendi iç yapısında giriş parametrelerini optimize eden bir sistem kurulmuştur. RTSED, PED ve AB giriş değerleri işlem katmanında işlemin içerisinde "Wlan\_mac.pr.m" kod bloğunda ajan yapısı ile dinamik olarak güncellenmiştir. Bu dinamik yapıda kaba kuvvet algoritması kullanılmıştır.

İşlem katmanında her bir işlemin içerisinde döngüler ve fonksiyonlar bulunmaktadır. OPNET Modeller kendi içerisinde yer alan hazır fonksiyonlarla birçok ağ protokolünü koşturmaktadır [Şekil 11]. Durum değişkeni (State Variable-SV) alanında global değişkenler tanımlanmakta, Geçici Değişken (Temporary Variable-TV) alanında geçici değişkenler tanımlanmaktadır. Kullanılacak olan sınıflar ve fonksiyonlar Başlık Bloğu'nda (Header Block- HB), fonksiyonların uygulaması ise Fonksiyonel Blok'ta (Functional Block-FB) yapılmaktadır. Tanı-Teşhis Bloğu'nda (Diagnostic Block-DB) hata mesajları kontrol edilmektedir. Sonlandırma bloğunda (Terminates Block-TB) ise program sonlandırılmaktadır.



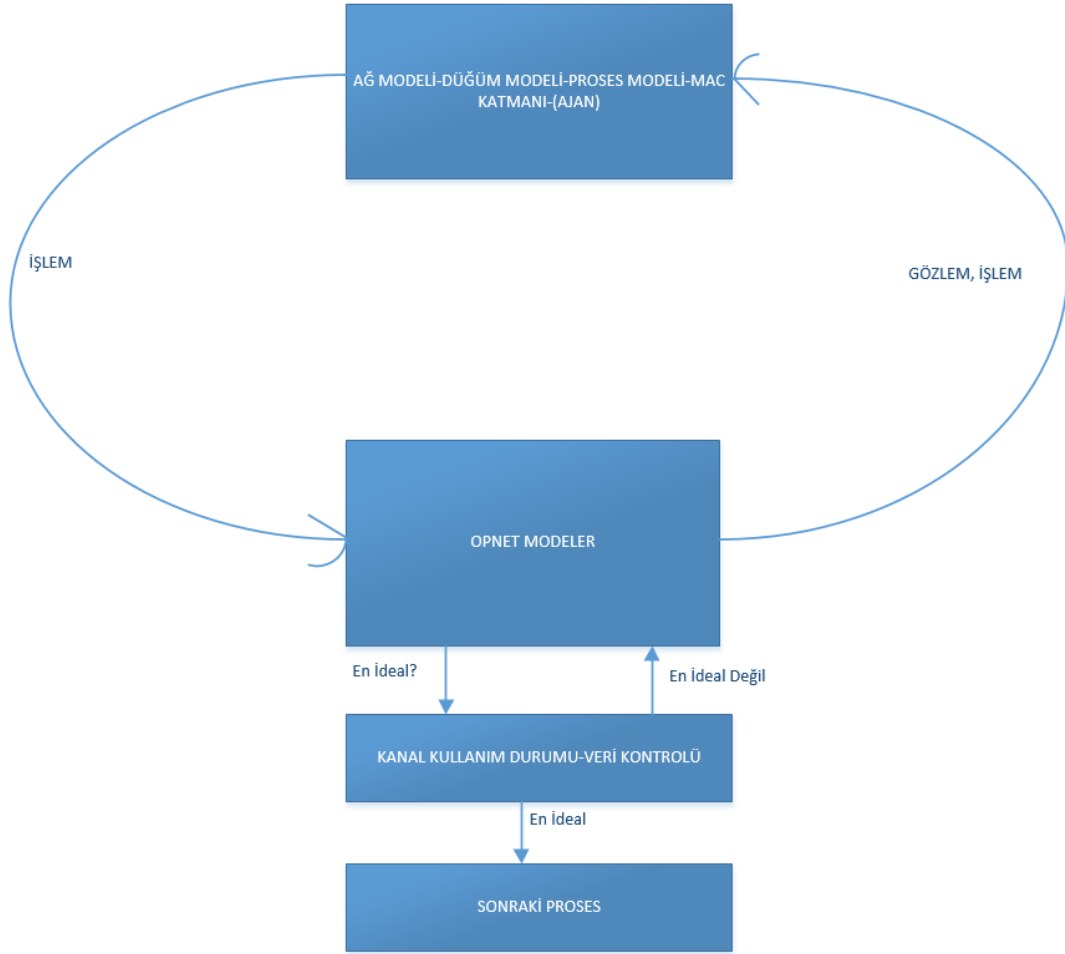
```

118  /* Unrecoverable error-- not all BSS IDs have been configured. Cannot */
119  /* what the BSS ID should be, hence terminate. */
120
121  wlan_error_print ("BSS ID not set in a node which belongs to a network in which some BSS IDs are set",
122                  "Please set a non-default BSS ID on all nodes in the network", OPC_NIL);
123  }
124
125  /* Use the subnet ID as the BSS ID if it is set to "Auto Assigned". */
126  if (bss_id_type == wlanC_Entire_Subnet)
127  {
128      bss_id = my_subnet_objid;
129  }
130
131  /* Get model attributes. */
132  op_ima_obj_attr_get (params_attr_objid, "Data Rate", &data_tx_rate);
133  op_ima_obj_attr_get (params_attr_objid, "Fragmentation Threshold", &frag_threshold);
134  op_ima_obj_attr_get (params_attr_objid, "Rts Threshold", &rts_threshold);
135  op_ima_obj_attr_get (params_attr_objid, "Short Retry Limit", &short_retry_limit);
136  op_ima_obj_attr_get (params_attr_objid, "Long Retry Limit", &long_retry_limit);
137  op_ima_obj_attr_get (params_attr_objid, "Access Point Functionality", &ap_flag);
138  op_ima_obj_attr_get (params_attr_objid, "AP Beacon Interval", &beacon_int);
139  op_ima_obj_attr_get (params_attr_objid, "Buffer Size", &hld_max_size);
140  op_ima_obj_attr_get (params_attr_objid, "Max Receive Lifetime", &max_receive_lifetime);
141  op_ima_obj_attr_get (params_attr_objid, "Large Packet Processing", &accept_large_packets);
142  /* If specified, convert the fragmentation and RTS thresholds to bits. */
143
144
145  if (op_prg_odb_trace_active ("inputbayram"))
146  {
147
148      sprintf (str1, "started values from interface for Fragmentation threshold, Rts threshold and Buffer size
149               op_prg_odb_print_minor ("\n", str1, OPC_NIL);
150  }
151
152  //Bayram assign receiver results all results are average of 40.000 events.
153

```

Şekil 11. OPNET Modeller wlan\_mac.pr.m kod yapısı

OPNET Modeller çıkış fonksiyonlarında yer alan kanal verimliliğini “real time” da görüntülemeye izin vermemektedir. Zira kanalın verimliliği işlemin tamamı bittikten sonra ortalama değer olarak görüntülenmektedir. Bu nedenle sistemimizde yer alan döngüsel tabloda 125 farklı giriş değerlerine sahip kanal kullanım durumu kod blok yapısına ezberletilmiştir. Bu dizin yapısında RTSED, PED ve AB değerlerinin Tablo 2’de yer alan tüm farklı senaryoları içerecek şekilde kanal verimliliği ataması, döngüsel ve pekiştirmeli öğrenme ile koşum esnasında ideal kanal kullanım durumu için giriş değerleri ile optimize etmiştir. Bu yapı OPNET’te döngüsel olarak gömülü ilk algoritma olarak ortaya çıkartılmıştır. Bu yapı özetle Şekil 12’de modellenmiş ve uygulanmıştır.



**Şekil 12.** OPNET Modeller döngü tablosu ajan yapısı

Kod blok yapısında gerçekleştirilen çalışmada 125 adetlik dizin yapısında kanal kullanım durumu ilk olarak “wlan\_accepted\_frame\_stats\_update ()” fonksiyonuna öğretilmiş ve daha sonra döngüsel olarak kanal kullanım durumu kaba kuvvet algoritması ile güncellenmiştir [Şekil 13].

Burada yer alan kanal kullanım durumu alıcı kanal kullanım durumunu ifade etmektedir ve bu veriler yukarıdaki şekilde dizine hazır olarak aktarılmıştır. OPNET Modeller’in yapısı gereği giriş değişkenleri ancak 1. işlem (init işlemi) üzerinden değiştirilebilmektedir. Bu nedenle modelimizde bu verilerden sonra (döngü sonrası) ideal giriş değerleri sağlandıktan sonra bir sonraki işlem işletilmektedir.

Yapılan çalışmamızda giriş değişkenlerinden RTSED, PED ve AB’nin benzetim anında koşumu kontrol edilerek benzetim esnasında güncellenmesi amaçlanmaktadır. Bu amaçla servis kalitesini direk etkileyen kanal kullanım durumu kaba kuvvet algoritması ile kontrol edilerek benzetimde bir pekiştirmeli öğrenme sistemi oluşturulmuştur. Kod blok yapısında “wlan\_mac.pr.m” üzerinde yapılan değişiklikler ile kod yapısı güncellenmiştir. İlk olarak giriş değerlerinde kullanılacak olan değerler “state variables” alanında tanımlanmış ve “Functional Blok” alanında bulunan wlan\_mac\_sv\_init () fonksiyonu kullanılarak ara girdilere ilk değerleri atanmıştır. Yine FB’de yer alan wlan\_accepted\_frame\_stats\_update () fonksiyonu kullanılarak “pk\_size” parametre girişi üzerinden birim zamanda işlenen paket miktarının her bir saniye de bir giriş değerleri kullanılarak güncellenmesi sağlanmıştır.

```

131
134 rts_thr [0]=600; frg_thr [0]=600; bs [0]=9000; receiver_utilization [0]= 10.75;
135 rts_thr [1]=600; frg_thr [1]=600; bs [1]=10000; receiver_utilization [1]= 17.75;
136 rts_thr [2]=600; frg_thr [2]=600; bs [2]=12000; receiver_utilization [2]= 19.42;
137 rts_thr [3]=600; frg_thr [3]=600; bs [3]=13000; receiver_utilization [3]= 20.28;
138 rts_thr [4]=600; frg_thr [4]=600; bs [4]=15000; receiver_utilization [4]= 19.48;
139
140
141 rts_thr [5]=600; frg_thr [5]=700; bs [5]=9000; receiver_utilization [5]= 10.25;
142 rts_thr [6]=600; frg_thr [6]=700; bs [6]=10000; receiver_utilization [6]= 11.82;
143 rts_thr [7]=600; frg_thr [7]=700; bs [7]=12000; receiver_utilization [7]= 13.029;
144 rts_thr [8]=600; frg_thr [8]=700; bs [8]=13000; receiver_utilization [8]= 13.02;
145 rts_thr [9]=600; frg_thr [9]=700; bs [9]=15000; receiver_utilization [9]= 13.33;
146
147
148 rts_thr [10]=600; frg_thr [10]=900; bs [10]=9000; receiver_utilization [10]= 9.48;
149 rts_thr [11]=600; frg_thr [11]=900; bs [11]=10000; receiver_utilization [11]= 11.54;
150 rts_thr [12]=600; frg_thr [12]=900; bs [12]=12000; receiver_utilization [12]= 17.25;
151 rts_thr [13]=600; frg_thr [13]=900; bs [13]=13000; receiver_utilization [13]= 18.06;
152 rts_thr [14]=600; frg_thr [14]=900; bs [14]=15000; receiver_utilization [14]= 17.09;
153
154
155 rts_thr [15]=600; frg_thr [15]=1000; bs [15]=9000; receiver_utilization [15]= 9.24;
156 rts_thr [16]=600; frg_thr [16]=1000; bs [16]=10000; receiver_utilization [16]= 11.92;
157 rts_thr [17]=600; frg_thr [17]=1000; bs [17]=12000; receiver_utilization [17]= 16.66;
158 rts_thr [18]=600; frg_thr [18]=1000; bs [18]=13000; receiver_utilization [18]= 17.16;
159 rts_thr [19]=600; frg_thr [19]=1000; bs [19]=15000; receiver_utilization [19]= 16.65;
160
161
162 rts_thr [20]=600; frg_thr [20]=1200; bs [20]=9000; receiver_utilization [20]= 8.88;
163 rts_thr [21]=600; frg_thr [21]=1200; bs [21]=10000; receiver_utilization [21]= 11.21;
164 rts_thr [22]=600; frg_thr [22]=1200; bs [22]=12000; receiver_utilization [22]= 16.05;
165 rts_thr [23]=600; frg_thr [23]=1200; bs [23]=13000; receiver_utilization [23]= 16.78;
166 rts_thr [24]=600; frg_thr [24]=1200; bs [24]=15000; receiver_utilization [24]= 16.94;
167
168
169 rts_thr [25]=700; frg_thr [25]=600; bs [25]=9000; receiver_utilization [25]= 10.24;
170 rts_thr [26]=700; frg_thr [26]=600; bs [26]=10000; receiver_utilization [26]= 11.2;
171 rts_thr [27]=700; frg_thr [27]=600; bs [27]=12000; receiver_utilization [27]= 18.85;
172 rts_thr [28]=700; frg_thr [28]=600; bs [28]=13000; receiver_utilization [28]= 19.42;
173 rts_thr [29]=700; frg_thr [29]=600; bs [29]=15000; receiver_utilization [29]= 20.07;

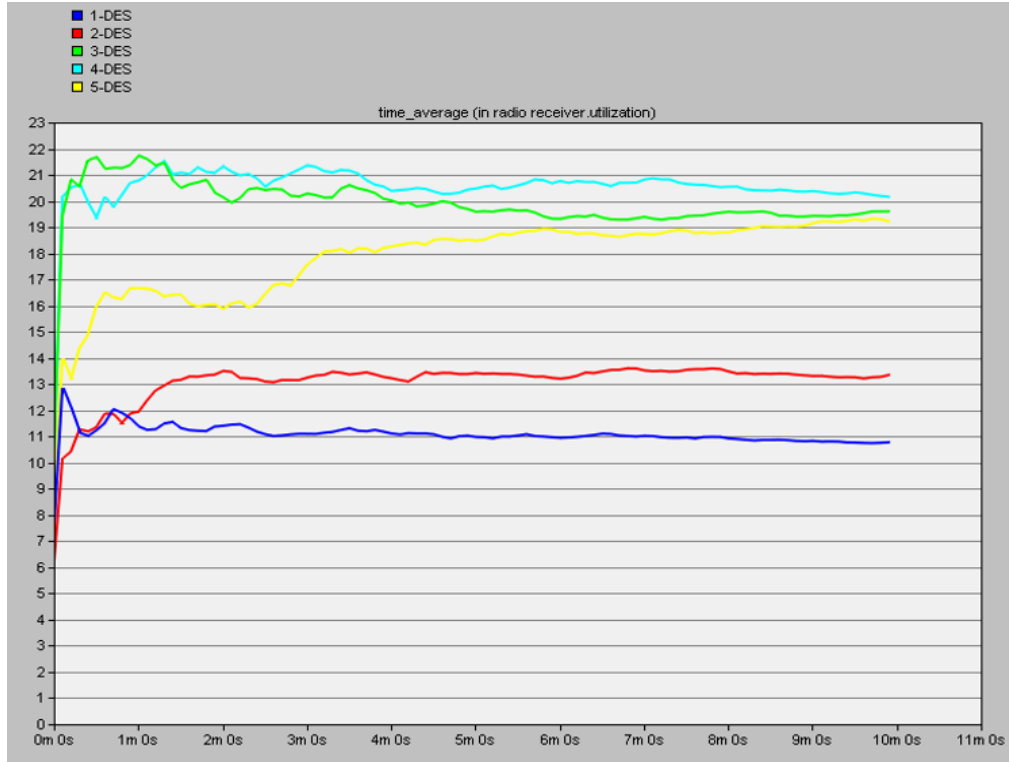
```

**Şekil 13.** OPNET Modeller FB döngü tablosu kullanımı

Bu modelde giriş parametreleri başlangıçta “default” değerlerinde iken bu giriş değerleri her seferinde koda gömülü olan kanal kullanım durumu ile kontrol edilmekte ve ideal değerinde değil ise döngüyü tekrar etmektedir. Bu döngü her bir giriş değerinde bir saniye durarak devam etmektedir. Burada bir saniye ile amaç giriş değişkenlerine o aşamada belirli bir süre ve dış etkenden bağımsız bir şekilde kontrol edebilme mekanizmasını sağlamaktır. Örneğin başlangıçta yer alan değerler önce ağ katmanı sonra düğüm katmanı ve sonra da işlem model katmanında ilgili kod alanında kontrol çıkış parametreleri ile karşılaştırmalı olarak kontrol edilmekte ve eğer değer ideal değil ise OPNET Modeller işleminde tekrar ajan ile döngü sürmektedir. Bütün değerler ideal hale geldiğinde işlem bu döngüden çıkıp ideal değerini alarak diğer verileri de test ederek kontrol edebilmektedir.

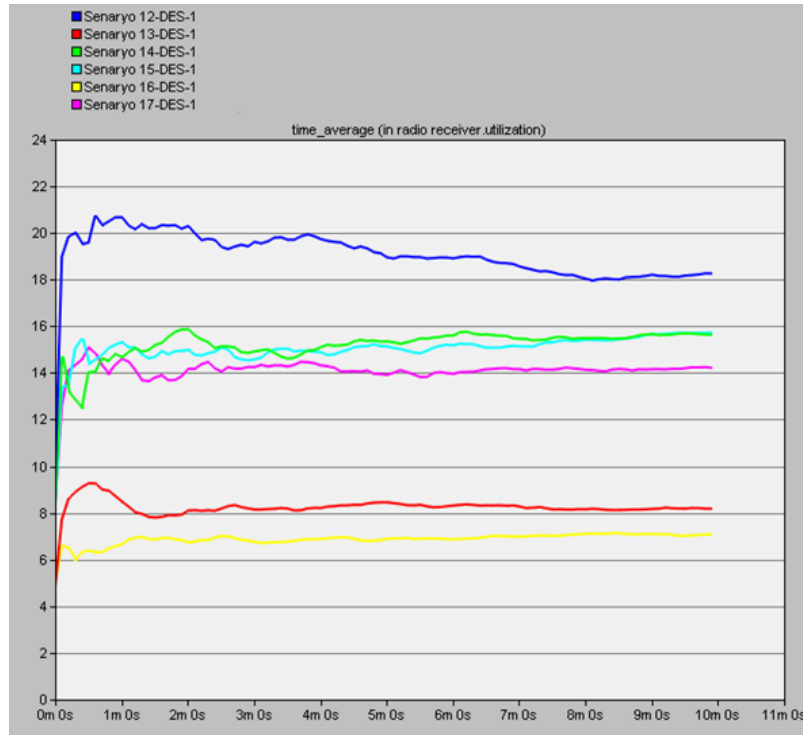
### 3.1. Döngü Tablosu Çıkış Parametresi ile Performans Karşılaştırmaları (Performance Comparisons with Loop Table Output Parameter)

Uygulanan yeni yöntemle birlikte dinamik olarak giriş değişkenleri kendini güncelleyebilmekte ve en ideal kanal kullanım durumunu ortaya çıkarmaktadır. Bu OPNET Modeller’da daha önce test edilmeyen ve koşum esnasında gerçekleşen ilk yöntem olarak ortaya çıkmıştır. Örnek olarak döngü tablosunda çıkış değeri için ideal değer %20,28 ile dördüncü senaryoda yer almaktadır. Kaba kuvvet algoritması ilk dört senaryoda ideal durumunu güncellemiş ve sonrasında ise ideal değeri kazandıktan sonra güncelleme yapmamıştır. Test sonuçlarına karşılaştırmalarına bakıldığında en ideal kanal kullanım durumunun %20,28 ile dördüncü senaryo olduğu görülmektedir. En ideal Kanal Kullanım durumu performans sonucu Şekil 14’de gösterilmiştir.



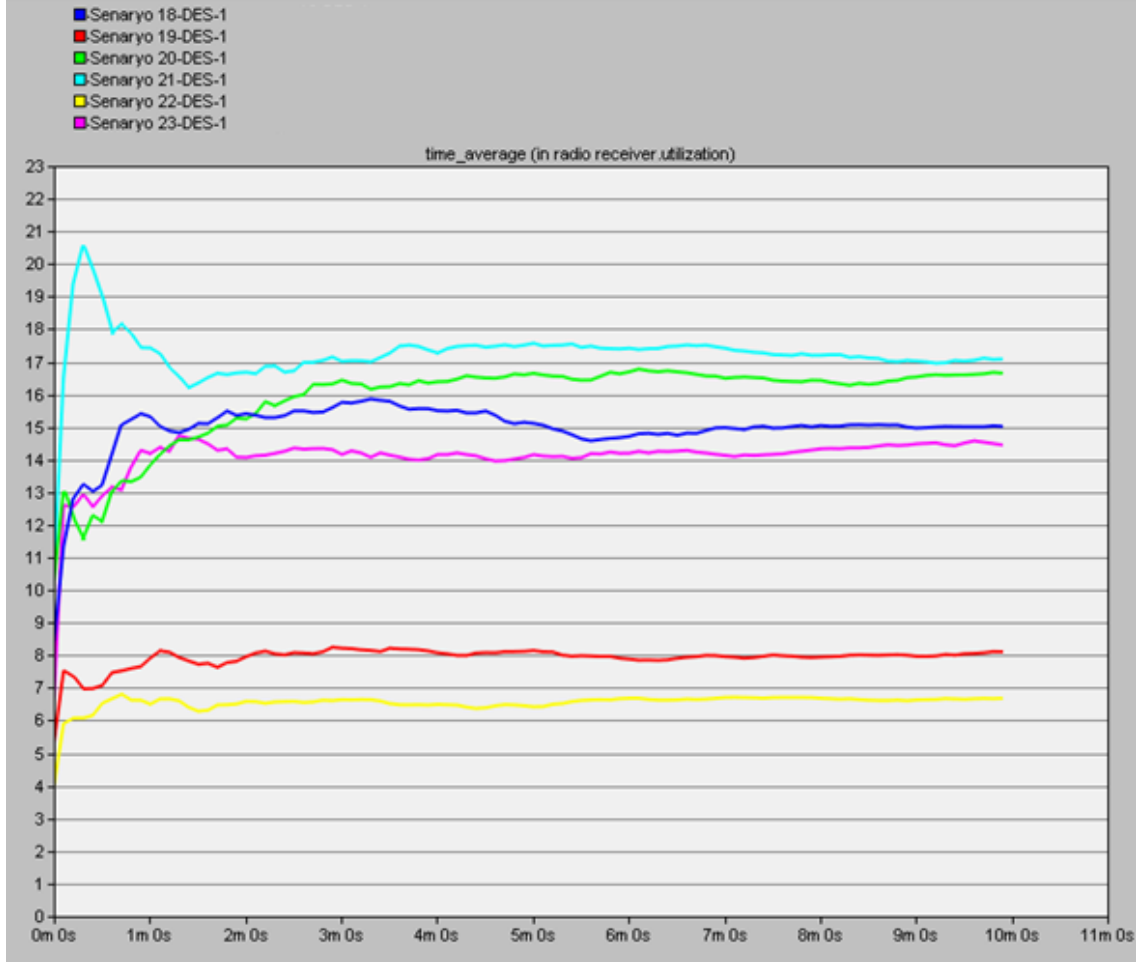
Şekil 14. Döngü tablosu performans sonuçları-1

Bir diğer test sonuçlarında ise döngü tablosunda ilk koşulda 12.senaryoda elde edilen ideal değer döngü tablosunda yer alan test sonuçları devam etmesine rağmen ideal değer olduğu için kanal kullanım durumunu RTSED için 600 bayt, PED için 900 bayt ve AB için 10000 bit olarak giriş değerlerine atamaları yapılmıştır. Yeni yöntemle birlikte dinamik olarak giriş değişkenleri kendini güncellemiş ve kaba kuvvet algoritması ilk durumunu korumuş, ideal değeri kazandıktan sonra güncelleme yapmamıştır [Şekil 15].



Şekil 15. Döngü tablosu performans sonuçları-2

Bir diğer test sonuçlarında ise döngü tablosunda ilk koşulda 21. senaryoda ideal değer belirlenmiş ve kanal kullanım durumunun ideal olarak kullanmak için RTSED için 600 bayt, PED için 1200 bayt ve AB için 9000 bit olarak giriş değerlerine atamaları yapılmıştır. Yeni yöntemle birlikte dinamik olarak giriş değişkenleri kendini Kaba kuvvet algoritması ile güncellemiş ve kanal kullanım durumu ideal değeri kazandıktan sonra güncelleme yapmamıştır [Şekil 16].



Şekil 16. Döngü tablosu performans sonuçları-3

Bu modelde giriş parametreleri (RSTED, PED, AB) başlangıçta default değerlerinde iken bu giriş değerleri her seferinde koda gömülü olan çıkış parametresi ile kontrol edilmekte ve ideal değerinde değil ise döngüyü tekrar etmektedir. Örneğin başlangıçta yer alan değerler önce ağ katmanı sonra düğüm katmanı ve sonra da işlem model katmanında ilgili kod alanında kontrol çıkış parametreleri ile karşılaştırılmalı olarak kontrol edilmekte (ajan) eğer değer ideal değil ise OPNET Modeler işleminde (environment) tekrar ajan ile döngü sürmektedir.

#### 4. SONUÇ (CONCLUSION)

WLAN'larda MAC katmanında CSMA/CA protokolünde yapılan birçok çalışmada giriş parametreleri OPNET Modeler üzerinden test edilmiş ve veri setleri elde edilmiştir. Elde edilen bu veri setleri üzerinden farklı algoritmalar uygulanarak çıkış parametrelerinde performans artışı sağlanmıştır. Bu çalışmada ise RTSED, PED ve AB giriş parametrelerinin çıkış parametresi olan kanal kullanım durumunu benzetim çalışması anında artış sağlanmıştır. Bu dinamik yapıda kaba kuvvet algoritması ile döngü tablosu kullanılarak pekiştirmeli öğrenme ile ideal kanal kullanım durumu sağlanmıştır. Kullanılan bu yeni yöntemde yeni bir ajan yapısı kullanılmıştır. RTSED, PED ve AB giriş değerleri en alt tabakada yer alan "Wlan\_mac.pr.m" kod bloğunu döngüsel olarak güncelleyerek sırasıyla ağ katmanı, düğüm katmanı ve işlem katmanında kontrolleri sağlanmıştır. Yeni yöntemde kanal kullanım durumu koşul esnasında ideal



hale gelene kadar döngü tablosunda yer alan bütün senaryolar geri beslemeli olarak test edilmiştir. Bu yöntemle dinamik bir güncelleme sağlanarak daha önceden ortalama %10 olan kanal kullanım durumu %15-%18 oranına çıkartılmıştır.



#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Singh H., Singh T., Kaur M. (2014). Improving the quality of Service of EDCF over DCF For Real Time Applications Using Probability Algorithm. *International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering*, 3:4 6330- 6333.
- [2] Dalvi A., Svamy P., Meshram B.B. Meshram. (2011). DCF Improvement for Satisfactory Throughput of 802.11 WLAN. *International Journal on Computer Science and Engineering*, 3:7 2862-2868.
- [3] Zarinni F. (2015). Understanding and Improving Performance in Next-Generation WLANs and Cellular Networks. Dissertation, Stony Brook University,.
- [4] Sarmah S., Sarma S.K. (2016). Performane Analysis of IEEE 802.11 WLAN by Varying PCF, DCF and EDCF to Enhance Quality of Service. *International Journal of Computer Applications*, 138:3, 22-25.
- [5] Nj M., Suryana N., Sahib S., Hussin B. (2017) . RTS/CTS Framework Paradigm and WLAN Qos Provisioning Methods. *IJACSA*, 8:2, 176-186.
- [6] Cheng S.S., Huang C M., Tu T.H. (2017). A CSMA/CA-Based Media Access Protocol Using the Registered Backoff Time Vector (RBTv) Mechanism for M2M Communications. *Mobile Netw Appl*, 22:1, 83-97.
- [7] Kocak C., Karakurt H. B. (2019). Fuzzy logic-based performance improvement on MAC layer in wireless local area networks. *Neural Computing and Applications*, 31, 6113–6128.
- [8] Kocak C., Karakurt H. B. (2019). Data traffic optimization in wireless local area networks with artificial neural networks. *Journal Of Polytechnic* 22, 737–747.
- [9] Asadi A., Sciancalepore V., Mancuso V. (2015). On the Efficient Utilization of Radio Resources in Extremely Dense Wireless Networks. *IEEE Communications Magazine*, 126-132.
- [10] Malik S., Chaudhary R., Pathak A., Chakraborty SP. (2015). Modeling and analysis of IEEE 802.11 DCF MAC. In: 3rd International Conference on Recent Trends in Computing, *Procedia Computer Science*, 57:4, 73-482.
- [11] Choi S., Prado JD., N. SS., Mangold S. (2003). IEEE 802.11e contention-based channel access (EDCF) performance evaluation. In *IEEE International Conference on Communications, 2003. ICC'03*, 2, 1151-1156.
- [12] Kaur I., Bala M., Bajaj H. (2012). Performance evaluation of wlan by varying Pcf, Dcf and enhanced Dcf slots to improve quality of service. *IOSRJCE*, 2:5, 29-33.
- [13] Sidelnikov A., Yu J., Choi S. (2006). Fragmentation/Aggregation scheme for throughput enhancement of IEEE 802.11n WLAN. In: *Proc. IEEE APWCS*, 24-25.
- [14] Karakurt H.B. (2015). Performance Improvement With Fragmentation Threshold For The Co-Ordination Functions By Using Wireless Local Area Networks. Dissertation Gazi University,.
- [15] Karakurt H. B., Kocak C. (2015). On wireless network PCF, DCF and EDCF with fragmentation threshold. XVII. Academic Informatics Conference, Eskisehir/Turkey.

- [16] Borsuk B., Koçak C. (2016). Kablosuz Ağlarda Gizli Düğüm Probleminde IEEE 802.11 MAC Katmanı RTS/CTS Mekanizmasının Çoklu Ortam Uygulamalarında Performansa Etkisi. *Bilişim Teknolojileri Dergisi*, 9:2, 187-195.
- [17] Yoon S. G., Kang S. G. and Nam C. (2018). Priority Inversion Prevention Scheme for PLC Vehicle-to-Grid Communications Under the Hidden Station Problem. *IEEE TRANSACTIONS ON SMART GRID*, 9:6, 5887-5896.
- [18] Costa R., Portugal P., Vasques F., Montez C. and Moraes R. (2015). Limitations of the IEEE 802.11 DCF, PCF, EDCA and HCCA to handle real-time traffic. 2015 IEEE 13th International Conference on Industrial Informatics (INDIN), IEEE, Cambridge, UK.
- [19] Li T. (2007). Improving Performance for CSMA/CA Based Wireless Networks. Ph. D. Dissertation, Hamilton Institute National University of Ireland, Maynooth Maynooth, Co. Kildare, Ireland.
- [20] Purohit H., Joshi K. 2016. A Simulation Based Comparative Study on Channel Utilization Enhancement Using DITMC Technique in Speech and Data Communication of Mobile Network. 6th International Conference on Information Communication and Management, 201-204.
- [21] Lin C.H., Chen Y.C., Lin C.J. (2018). FDoF: Enhancing Channel Utilization for 802.11ac. *IEEE/ACM TRANSACTIONS ON NETWORKING*, 26:1, 465-477.
- [22] Kobayashi H., Kameda E., Terashima Y., Shinomiya N. (2018). Towards sustainable heterogeneous wireless networks: A decision strategy for AP selection with dynamic graphs. *Computer Networks*, 132, 99-107.
- [23] Wang S.Y, Chou C.L, Liu K.C., Ho T.W., Hung W.J., Huang C.F., Hsu M.S., Chen H.Y., Lin C.C. (2009). Improving the Channel Utilization of IEEE 802.11p/1609 Networks. 2009 IEEE Wireless Communications and Networking Conference, IEEE.
- [24] Laufer R., Kleinrock L. (2016). The Capacity of Wireless CSMA/CA Networks. *IEEE/ACM TRANSACTIONS ON NETWORKING*, 24:3, 1518-1532.
- [25] Yu Y., Wang T. and Liew C. (2019). Deep-Reinforcement Learning Multiple Access for Heterogeneous Wireless Networks. *IEEE Journal On Selected Areas In Communications*, 37:6, 1277-1290.
- [26] Bhattacharyya R., Bura A., Rengarajan D., Rumuly M., Shakkottai S., Kalathil D., Mok R. K. P. and Dhamdhare A. (2019). Q Flow: A Reinforcement Learning Approach to High QoE Video Streaming over Wireless Networks. arXiv preprint arXiv:1901.00959.
- [27] Şanlı M., Zengin F., Urhan O. (2005). Akıllı Kart ile Anahtar Güncellemeli 3-DES Algoritması Kullanarak Ön Ödemeli Sistem Uygulaması. SİU05.
- [28] Singh S., Chandra N., Tripathi A. K. (2015). Performance Analysis for Channel Utilization in Wireless LAN. *International Journal of Computer Applications*, 122:20, 40-44.
- [29] Yazid M., Medjkoune L.B., Aissani D., Amrouche N. (2014). Analytical Analysis of Applying Packet Fragmentation Mechanism on Both Basic and RTS/CTS Access Methods of the IEEE 802.11b DCF Network Under Imperfect Channel and Finite Load Conditions. *Wireless personal communications* 77:1, 477-506.
- [30] Bian K., Park J.M., Chen L., Li X. (2014). Addressing the Hidden Terminal Problem for Heterogeneous Coexistence Between TDM and CSMA Networks in White Space. *IEEE TRANSACTIONS ON VEHICULAR TECHNOLOGY* 63:9, 4450-4463.

- [31] Mewara H.S., Manghnani D. (2014). Rising up the Performance of Wireless Local Area Network by Varying Fragmentation Threshold using OPNET. *International Journal of Computer Applications*, 97:7, 22-25.
- [32] Inderjeet K., Manju B., Harpreet B. (2012). Performance Evaluation of Wlan by Varying PCF, DCF and Enhanced DCF Slots To Improve Quality of Service. *IOSR Journal of Computer Engineering (IOSRJCE)*, 2:5, 29-33.

## An Absorber-Based Metamaterial Sensor For Sensing Relative Humidity

 Mustafa Suphi GULSU  Fulya BAGCI\*  Baris AKAOGLU

Ankara University Faculty of Engineering, Department of Physics Engineering, 06100, Besevler/ANKARA

### Graphical/Tabular Abstract

#### Article Info:

Research article  
 Received: 11/04/2020  
 Revision: 10/06/2020  
 Accepted: 03/07/2020

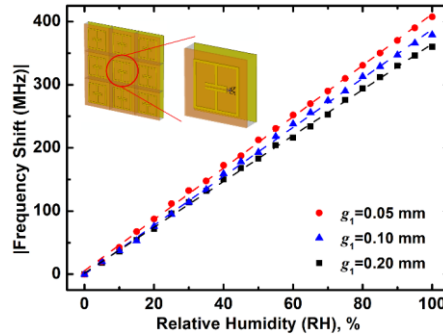
#### Highlights

- Relative humidity sensor
- Metamaterial
- Sensitivity

#### Keywords

C band  
 Equivalent Circuit  
 Kapton HN film  
 Surface Current  
 Electric Field

In this study, a relative humidity sensor based on a metamaterial consisting of electric-inductive capacitive resonators and a commercial polyimide band on top of a transparent copper-backed substrate is designed for C band satellite communication frequencies. The resonance frequency of the metamaterial is estimated by an equivalent circuit approach. Later, the spectral response is characterized by three-dimensional electromagnetic simulations. The effect of the gap width of the electric-inductive capacitive resonator on the sensitivity of the relative humidity is investigated. It is found that decreasing the gap width of the resonators has a positive effect. On the other hand, increasing the thickness of the polyimide band did not show any enhancement on the sensitivity value. The designed sensor has potential to be used for tracking climate and environmental conditions.



**Figure A.** Absolute frequency shift as a function of % relative humidity for different gap width values

**Purpose:** A metamaterial based highly sensitive relative humidity sensor is aimed to be designed at C-band frequencies, which is suitable for tracking climate and environmental conditions.

**Theory and Methods:** A metamaterial sensor for relative humidity sensing is designed by utilizing from equivalent circuit approach and by using a three-dimensional electromagnetic solver based on finite integration technique. Reflection spectra are calculated for relative humidity ratios of environments ranging from 0% to 100% in 5% steps. Relationship between the shift of the resonance frequency and relative humidity change is put forward for structure parameters.

**Results:** The metamaterial comprising of electric-inductive capacitive resonators is estimated to show a resonance at 8.38 GHz by the equivalent circuit approach and at 8.57 GHz by the numerical analysis. When the metamaterial is coated with a commercial polyimide band, Kapton HN, the resonance frequency is shifted to 7.00 GHz with -36 dB attenuation. Surface current distribution over the metamaterial unit cell at the resonance frequency is investigated to have a physical background of the resonance effect. The resonance linearly shifts to lower frequencies as the relative humidity is increased. Effects of the gap width of the resonator and thickness of the polyimide band on the sensitivity of the sensor are investigated.

**Conclusion:** A metamaterial sensor having 4.07 MHz/RH of relative humidity (RH) sensitivity is demonstrated numerically for C-band meteorology applications. It is found that the sensitivity of the metamaterial based sensor increases for narrower gap widths since the localization of the electric field increases.



## Bağıl Nem Oranını Algılamaya Yönelik Soğurucu Tabanlı Metamalzeme Sensör

Mustafa Suphi GÜLSU<sup>ID</sup> Fulya BAĞCI\*<sup>ID</sup> Barış AKAOĞLU

Ankara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Fizik Mühendisliği Bölümü, 06100, Beşevler/ANKARA

### Öz

Bu çalışmada yansıma spektrumunun izlenmesi ile ortamdaki bağıl nem oranını algılamaya yönelik soğurucu tabanlı bir metamalzeme sensör geliştirilmiştir. Hava radar sistemlerinde kullanılan C bandı esas alınarak 7,0 GHz frekansında tepki veren bir metamalzeme sensör tasarlanmıştır. Ortamın bağıl nem miktarının artmasıyla rezonans frekans doğrusal biçimde değişmektedir. Rezonatörde elektrik alanın yoğun biçimde depo edildiği bölgenin genişliğinin bağıl nem sensörünün duyarlılığına etkisi incelenmiştir. Geliştirilen ve optimize edilen sensör her %1 kadarlık bağıl nem değişimine karşı 4,07 MHz kadar frekansta kayma göstermektedir. Neme duyarlı polimit bandın kalınlığının metamalzeme sensörün bağıl nem duyarlılığına kayda değer ölçüde etkisi olmadığı sonucuna varılmıştır. Önerilen sensör iklim ve çevre koşullarının takibinde kullanılabilir.

### Makale Bilgisi

Araştırma makalesi  
Başvuru: 11/04/2020  
Düzeltilme: 10/06/2020  
Kabul: 03/07/2020

### Anahtar Kelimeler

Bağıl Nem Sensörü  
Metamalzeme  
Duyarlılık

### Keywords

C Bandı  
Eşdeğer Devre  
Kapton HN filmi  
Yüzey Akımı  
Elektrik Alan

## An Absorber-Based Metamaterial Sensor For Sensing Relative Humidity

### Abstract

An absorber-based metamaterial sensor is developed for detecting the relative humidity of the environment by monitoring the reflection spectrum. Considering C band used in air radar systems as a basis, a metamaterial sensor that responds at a frequency of 7.0 GHz is designed. As the relative humidity of the environment increases, the resonance frequency changes linearly. The impact of the width of the region, where the electric field is intensively concentrated, on the sensitivity of the sensor is investigated. The developed and optimized sensor shows a frequency shift of 4.07 MHz against every 1% change in the relative humidity. It was concluded that the thickness of the humidity-sensitive polymer band does not remarkably affect the relative humidity sensitivity of the metamaterial sensor. The proposed sensor can be used for tracking climate and environmental conditions.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Hava ve iklimi etkileyen su deviniminin en önemli parçası havadaki nem miktarıdır. İklim bilimciler, insan kökenli ortaya çıkan küresel ısınma sonucu her 1°C'lik sıcaklık artışının, atmosferde bulunan su buharı miktarında yaklaşık olarak %7 oranında artmaya neden olduğunu ortaya koymuşlardır. Küresel ısınma, aşırı yağışlara ve şiddetli sellere neden olabilmektedir. Ekoloji, tarım, jeoloji ve tıp gibi alanlar içerisinde, nem daha çok bağıl nem biçiminde ele alınmakta ve önemli bir parametre olarak göze çarpmaktadır. Bağıl nem değeri, genellikle yüzde üzerinden verilmektedir. Bağıl nem, havadaki nemin belirli bir hava sıcaklığında taşıyabileceği en yüksek neme oranına denilmektedir[1]. Bağıl nem, tarıma uygun bitki ve meyve ağaçlarının yaprakları üzerinde suyun tutunmasından çeşitli mantar ve bakterilerin gelişmesine, fotosentez sürecinde gazların yer değiştirmesinden yararlı ve zararlı böcek türlerinin var olmasına kadar birçok biyofiziksel çevreyi etkileyen bir parametredir. İnsanların ev ve iş yerleri olarak kullandığı kapalı alanlarda klima kullanımı, üst solunum yolu, kronik obstruktif akciğer hasatlığı (KOA) ve zatürre gibi tehlikeli alt solunum yolu hastalıklarının artmasına yol açmaktadır. Bu sebeple, ortamın bağıl nem değerinin dikkatle izlenmesi gerekmektedir[2,3]. Bunlarında ötesinde, hastanelerde, temiz odalarda, tarihi belgelerin bulunduğu arşiv odalarında, müzelerde, elektronik cihazların korunmasında ve yüksek gerilim

çalışmalarının yapıldığı laboratuvarlarda bağıl nem algılayıcılarının varlığı büyük bir öneme sahiptir[4]. Gıda malzemelerinin raf ömürlerini uzun tutmak amacı ile de ortamın nem değerini belirli bir değerin altında tutmak gereklidir[5].

Son yıllarda mikrodalga frekanslarda ölçüm yapabilen metamalzeme tabanlı kırılma indisi, mikroakışkan, gerinim ve basınç sensörleri üzerine çok sayıda çalışmalar yürütülmektedir[6-9]. Gerinim sensörlerinde, sensörü oluşturan rezonatörün genişliği ve boyunun değişimi kapasitans değerini de değiştirdiğinden, rezonans frekansının da değişmesine neden olmaktadır[10,11]. Mikroakışkan sensörlerde mikro kanallardan akan sıvının dielektrik sabitinin en küçük değişimi rezonatörün kapasitif etkiye sahip bölgedeki elektrik alan dağılımını etkilemesinden dolayı rezonans frekansında kaymaya sebep olmaktadır[12]. Benzer şekilde, metamalzeme tabanlı nem sensörlerinde ortamın sahip olduğu su buharı miktarının değişiminin rezonans frekansında kaymaya neden olduğu tespit edilmiştir[4]. Örneğin, toprak içerisine yerleştirilen farklı tipte metamalzeme ile gerçekleştirilen bir çalışmada en yüksek frekans kayması 1,5 GHz'teki rezonans frekanstan 910 MHz kayma ile ayırık halka rezonatörlerden oluşan metamalzeme yapısında gözlenmiştir[13].

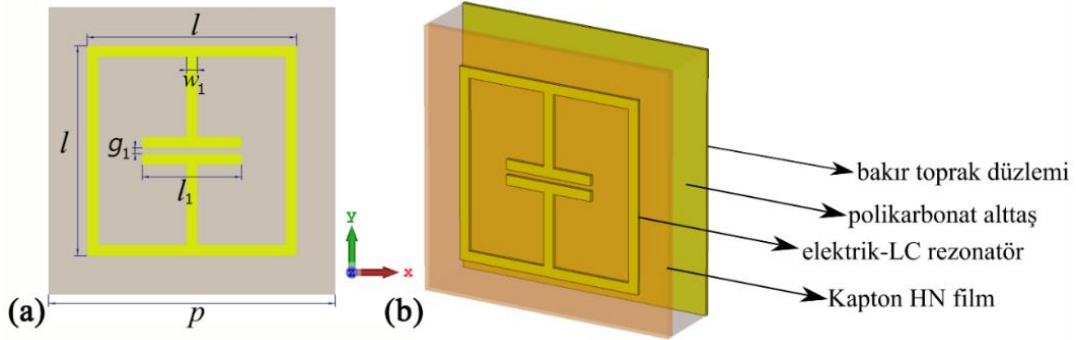
Nemi algılamak için iyi proton iletkenliğine sahip olmalarından ötürü  $Al_2O_3$ ,  $TiO_2$  gibi oksit bazlı bazı seramik malzemeler kullanılmıştır[14,15]. Fakat, bu malzemelerin nem algılama aralıkları dardır. Son yıllarda, bu sebepten ötürü polimer bazlı nem algılayıcılarına yönelik ilgi artmıştır. Bu çalışmanın amacı, metamalzeme tabanlı sensör ile nem algılama davranışının incelenmesidir. Ortamın bağıl nemini en iyi ayırt edebilecek özelliklere sahip bir sensör tasarımı amacıyla en uygun rezonatör yapısı ve alttaş olarak, sırasıyla, elektrik indüktif-kapasitif (LC) rezonatör ve saydam ile esnek olduğundan polikarbonat malzemesi seçilmiştir. Yakın zamanda benzer biçimde elektrik LC rezonatör yapılı bir metamalzeme kullanılarak, metamalzemenin tüm yüzeyinin ipek protein fibroin ile kaplanmasıyla THz frekanslarda bir nem sensörü geliştirilmiştir[16]. Bu çalışma ise mikrodalga frekanslara yönelik olup, çalışmada nemi algılamak üzere uygun bir fiyata ticari olarak satın alınabilen, su tutma özelliğine sahip aromatik ticari bir polimit olan Kapton HN bant seçilmiştir. Bantın dielektrik sabiti, ortamın bağıl nem değerinin değişiminden etkilenerek değişiklik göstermektedir[17]. Kapton HN bant ile radyo frekans tanımlama (RFID) teknolojisine yönelik nem sensörü yapımı için 860-930 MHz frekans aralığında çalışılmıştır[18]. Bu çalışmada ise Kapton HN bant, metamalzeme rezonatör ile birlikte kullanılarak sensörün duyarlılığının artırılması hedeflenmiştir. Ortamdaki bağıl nem değişimini algılama yetkinliği üç boyutlu bir elektromanyetik benzetim programı kullanılarak incelenmiştir.

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

Bu çalışmada, elektromanyetik soğurucu özelliği sergileyen metamalzeme tasarımı için elektrik-LC rezonatör yapısı kullanılmıştır. Elektrik-LC rezonatörlere sahip metamalzemenin bir birim hücrenin tasarımı ve bu tasarıma ait geometri parametreleri Şekil 1(a)'da gösterilmektedir. Elektrik-LC rezonatörünün seçilmesinin temel nedeni, Şekil 1(a)'da  $g_1$  parametresi ile gösterilen ayırık bölgelerinin gelen elektromanyetik dalganın elektrik alanı ile güçlü bir biçimde bağlanmasıdır[19-22]. Güçlü elektrik alan bağlaşımının nem sensörünün duyarlılığına büyük katkı sağlaması beklenmektedir. Elektrik-LC rezonatörlü metamalzemenin kare şeklindeki birim hücrenin kenar uzunluğu  $p$  parametresi ile gösterilmiştir ve 5,2 mm değerindedir. Metamalzeme, arka yüzü tamamen bakır kaplı, 1,25 mm kalınlıklı polikarbonat alttaş üzerinde bulunmaktadır. Rezonatör ve toprak düzleminde, yüksek iletkenlik özelliğinden ve az maliyetli olmasından ötürü bakır tercih edilmiştir. Bakır  $70 \mu m$  kalınlığa ve  $5,8 \times 10^8 S/m$  iletkenliğe sahiptir. Şekil 1(a)'da gösterilen elektrik-LC rezonatörün şerit genişliği ve boyu, sırasıyla  $w_1=0,2 mm$ ,  $l=3,8 mm$ ; kapasitif etki sağlayan kol uzunluğu  $l_1=1,8 mm$  ve ayırık mesafesi  $g_1=0,10 mm$ 'dir. Şekil 1(b)'de gösterildiği gibi metamalzeme sensörün ön yüzeyi üzerine kaplanan Kapton HN bantının kalınlığı ise  $0,1 mm$ 'dir.

Bağıl nem algılama özelliğine sahip soğurucu tabanlı metamalzeme sensör, üç farklı malzeme kullanılarak dört katmanlı olacak biçimde tasarlanmıştır (Şekil 1(b)). Elektromanyetik dalgalarla ilk önce etkileşen katmanda Kapton HN bant yapısı bulunmaktadır. Ortamın değişen bağıl nem oranından etkilenerek bu katmanın kompleks elektriksel geçirgenlik değeri değişiklik göstermektedir. Üst katmanın bir alt katmanını oluşturan ikinci katmanda, elektrik-LC rezonatör yapısı yer almaktadır. Elektrik-LC rezonatör elektrik-tipi

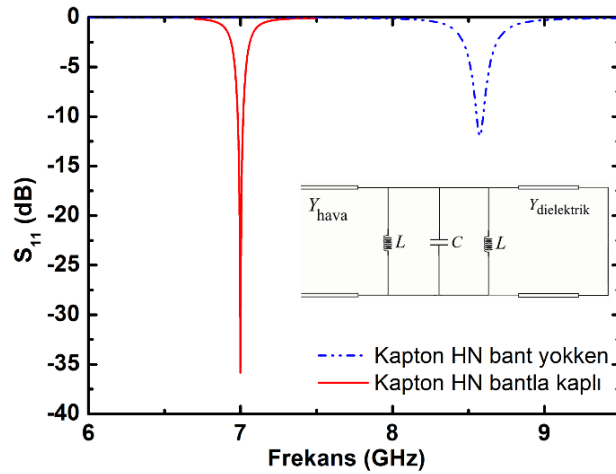
bir rezonatördür; gelen elektromanyetik dalganın elektrik alanı ile güçlü bir şekilde etkileşmektedir. Bu rezonatörün  $x=0$  düzlemine göre ayna simetrisi olduğundan manyetik tepkisi bulunmamaktadır[21]. Elektrik-LC rezonatör yapısı üzerinde kapasitif etki, arka yüzü bakır ile kaplı olduğundan ön yüzeyi ile etkileşiminden ötürü indüktif etki ortaya çıkmaktadır. Bu etkiler rezonansa girerek belirli bir frekansta yansımının en aza inmesini sağlamaktadır. Üçüncü katman olarak, elektrik-LC rezonatör ile bakır toprak düzlemi arasında polikarbonat alttaş kullanılmıştır. Kullanılan alttaşların kompleks dielektrik sabiti değerleri ve kalınlığının soğurma üzerinde önemli etkisi bulunmaktadır[21]. Polikarbonat alttaşın dielektrik sabit 2,9; kayıp tanjant parametresi 0,01 olarak alınmıştır. Kapton HN bandının dielektrik sabitinin gerçel kısmı bağıl neme (BN) bağlı olarak  $3,05+0,008 \times \%BN$  ile değişmektedir, kayıp tanjant değeri ise  $0,0015+0,00002 \times \%BN$  ile tanımlıdır[4,17].



Şekil 1. Elektrik-LC rezonatörünün birim hücresinin (a) önden ve (b) üç boyutlu temsili görünüşü

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

Elektrik-LC rezonatörlü soğurucu tabanlı metamalzeme Kapton HN bant ile kaplanmadığında 8,6 GHz frekansta  $-11,94$  dB'lik bir yansıma rezonansı göstermektedir. Üst yüzeyi Kapton HN bant ile kaplanarak sensör özelliği kazandırıldığında ise rezonans frekansı 7,0 GHz'e düşmektedir. Rezonans frekansı göz önüne alındığında metamalzeme sensörün birim hücre parametresi  $p=\lambda_0/8,2$ 'dir, toplam kalınlığı ise  $\lambda_0/25,2$  olmaktadır ( $\lambda_0$ , elektromanyetik dalganın boşluktaki rezonans dalga boyu). Bu durum tasarlanan sensörün elektriksel olarak oldukça küçük olduğuna işaret etmektedir. Tasarlanan sensörün nemsiz ortamda Kapton HN bant yokken ve kaplı iken hesaplanan yansıma spektrumları Şekil 2'de gösterilmiştir. Sensör, gönderilen elektromanyetik dalgalara 7,0 GHz'de  $-36,0$  dB ile güçlü bir tepki vermektedir. Metamalzeme sensörün arka tarafı tamamen bakır kaplı olduğundan elektromanyetik dalgalar iletilmemektedir. 7,0 GHz'de yansımının en aza indirilmesiyle %99,9 oranında soğurma gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2. Soğurucu tabanlı metamalzeme sensörün Kapton HN bant yokken ve kaplı iken yansıma spektrumları.

Kapton HN bant ile kaplı değilken elektrik-LC rezonatörlü metalmalzemenin eşdeğer devresi Şekil 2’de gösterilmiştir. Burada  $Y_{hava}$  ve  $Y_{dielektrik}$ , sırası ile havanın ve polikarbonat alttaşın admittanslarını ifade etmektedir. En alt tabaka toprak düzlemi olduğundan  $Y_{dielektrik}$  kısa devre ile sonlandırılmıştır. Elektrik-LC rezonatörün Şekil 1’de  $g_1$  ile gösterilen ayrık kısmı kapasitif etkiye sebep olduğundan eşdeğer devrede  $C$  kapasitansı ile, sağ ve sol taraflardaki metalik kollar ise indüktif etkiye sahip olduğu için iki adet  $L$  indüktansı ile gösterilmiştir. Kapasitans ve iki adet indüktans birbirine paraleldir[21]. Elektrik-LC rezonatörün rezonans frekansı  $f = 1 / (2\pi\sqrt{LC})$  ile ifade edilir[21]. Elektrik-LC rezonatörün  $C$  kapasitansı,

$$C = \epsilon_0 \epsilon_{polikarbonat} \frac{c_1 S}{h_{polikarbonat}} + \epsilon_0 \epsilon_{polikarbonat} \frac{w_1 h_{metal}}{g_1} \quad 1$$

ile belirlenmektedir[24]. Bu eşitlikteki  $\epsilon_0$  boş uzayın elektriksel geçirgenliği,  $\epsilon_{polikarbonat}$  polikarbonatın dielektrik sabiti,  $h_{metal}$  bakırın,  $h_{polikarbonat}$  polikarbonat alttaşın kalınlığıdır.  $S$  parametresi, elektrik-LC rezonatörün yüzey alanıdır.  $c_1$  geometrik bir çarpan olarak ele alınmıştır[24,25]. Kapasitans hesaplanırken ayrık eleman  $g_1$ ’in etkisi ve elektrik-LC rezonatörün toprak düzlemi ile olan kapasitif etkisi dikkate alınmıştır. Elektrik alan dağılımı incelendiğinde birim hücrelerdeki rezonatörler arası kapasitif etkinin zayıf olduğu gözlenmiştir. Bu sebeple kapasitans ifadesine dâhil edilmemiştir.

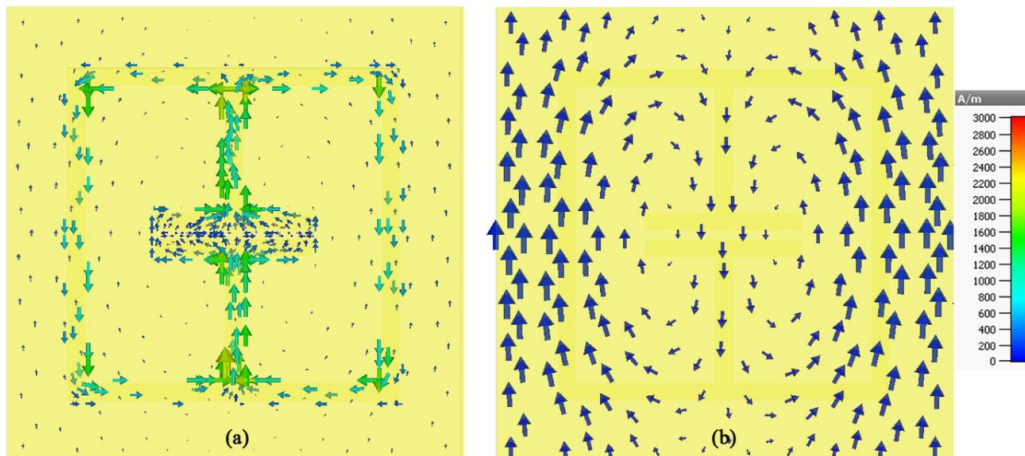
Elektrik-LC rezonatörün  $L$  indüktansı ise,

$$L = \mu_0 h_{polikarbonat} \left( \frac{2w_1}{l} + \frac{2l}{w_1} + \frac{l - 2w_1 - g_1}{w_1} \right) \quad 2$$

ile tanımlıdır[26]. Burada  $\mu_0$  boş uzayın manyetik geçirgenliğidir.

Elektrik-LC rezonatörlü metalmalzemenin rezonans frekansı, eşdeğer devre modeli ile hesaplamalar sonucunda 8,38 GHz olarak bulunmuştur. Bu rezonatörün üç boyutlu elektromanyetik benzetim programı ile 8,57 GHz frekansta rezonansa sahip olduğu hatırlandığında, eşdeğer devre modeli ile de oldukça yakın bir sonuç elde edildiği göze çarpmaktadır.

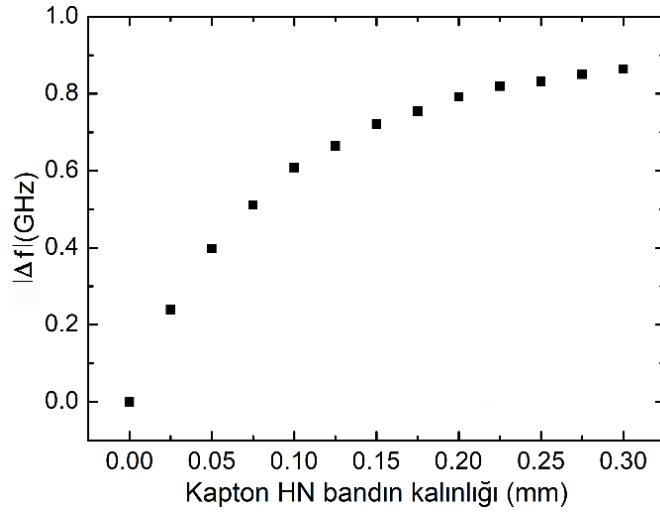
Rezonansın metalmalzeme yapısı ile ilişkisini belirlemek için rezonans frekansta yüzey akımları incelenmiştir. Metalmalzemenin ön ve arka yüzlerinde indüklenen yüzey akımları sırası ile Şekil 3(a) ve (b)’de gösterilmiştir. Şekil 3(a)’dan görüldüğü gibi yüzey akımları  $x=0$  düzlemine göre simetrik olduğundan net bir manyetik akı oluşturmaz[21]. Fakat Şekil 3(a) ve (b)’nin karşılaştırılması ile yüzey akım yönelimlerinin ön ve arka yüzde birbirine zıt olduğu görülmektedir. Bu durum bir manyetik momentin oluşmasına sebebiyet vermektedir[27-29]. Rezonatörün ayrık kısmından kaynaklanan elektrik dipol momentini ile manyetik moment etkileşerek 7,0 GHz frekansında bir rezonans oluşturmaktadır.



Şekil 3. Metalmalzeme sensörün birim hücrelerinin (a) ön yüzeyinde ve (b) arka bakır toprak düzlemde 7,0 GHz frekansta indüklenen yüzey akımları

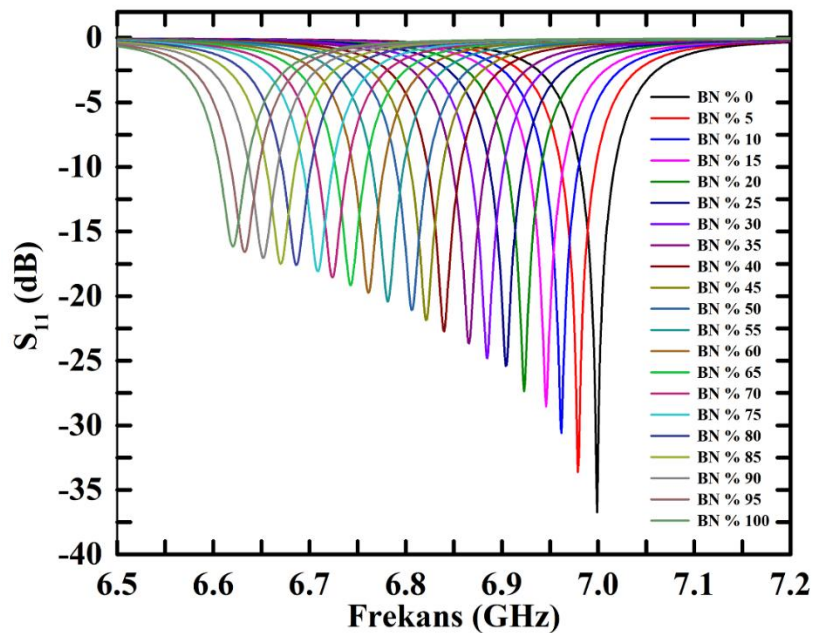


Kapton HN bandın kalınlığı 0,1 mm iken 7,0 GHz frekansta rezonans oluşarak yansıma minimum hale gelmektedir. Çalışmamızın bu kısmında metalzeme üzerinde Kapton HN bant yokken ve farklı kalınlıklarda Kapton HN bant kaplı iken rezonans frekansın nasıl değiştiği incelenmiştir. Kapton HN bandın kalınlığı arttıkça metalzemenin etkin dielektrik sabiti arttığı için frekans azalmaktadır. Fakat bu artış Şekil 4’den de görüleceği üzere doğrusal değil üstel biçimindedir. Kapton HN bandın kalınlığı 0,3 mm’den daha fazla olduğunda ise frekanstaki kayma ihmal edilecek boyuta ulaşmaktadır. Bu sonuçlar ipek protein fibroin ile kaplı elektrik-LC metalzemeli yapıda ipek protein fibroinin kalınlığının artmasıyla rezonans frekansın değişim eğrisine benzer biçimdedir[16].



Şekil 4. Kapton HN bandın kalınlığına bağlı olarak rezonans frekanstaki değişim

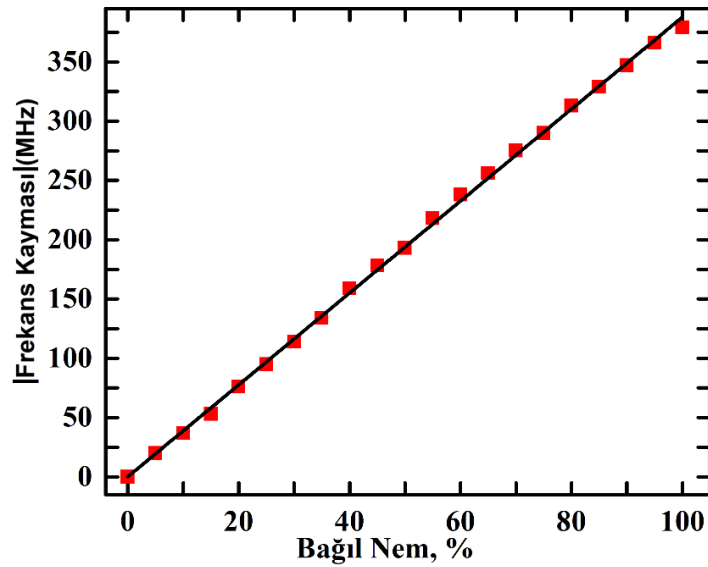
0,1 mm kalınlıkta Kapton HN bantlı soğurucu tabanlı metalzeme sensörün farklı bağıl nem oranlarında hesaplanan yansıma spektrumları Şekil 5’de gösterilmektedir. Ortamın sahip olduğu bağıl nem miktarı %0’dan %100’e kadar değişirken, rezonans frekansı 7,00 GHz’den 6,62 GHz’e kadar azalmıştır. %0’dan %100’e bağıl nem değişimi için rezonans frekansın kayma miktarı 380 MHz olarak bulunmuştur. THz frekanslarda gerçekleştirilen metalzeme tabanlı bir nem sensörü çalışmasında ara katmanda sudaki yoğunlaşmaya hassas olmasından ötürü gözenekli silikon kullanılmıştır. Gözenekli silikonda da su yoğunluğu arttıkça etkin dielektrik sabiti arttığından rezonans frekans azalışı göstermektedir. Fakat bu çalışmada metalzeme sensörün bağıl nem duyarlılığı yerine kırılma indisi duyarlılığı incelenmiştir[30].



Şekil 5. Kapton HN bant ile kaplı metalzeme sensörün bağıl nem değişimine bağlı yansıma spektrumları

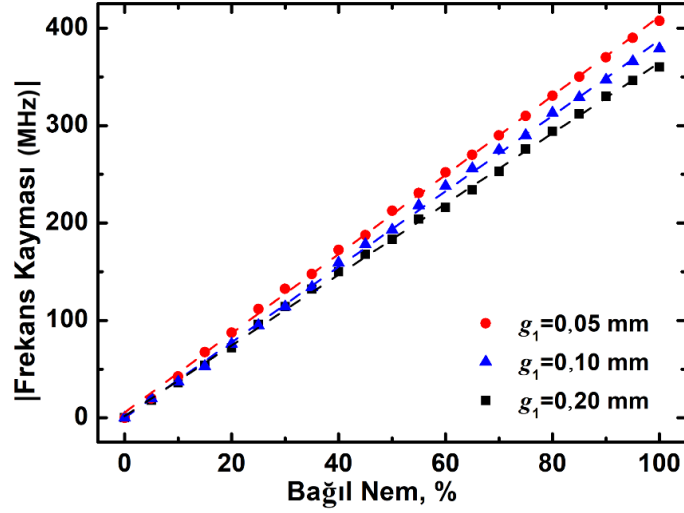
Rezonans frekansındaki kaymanın bağıl neme göre değişim sonuçları Şekil 6’da gösterilmektedir. Sensörün bağıl nem değişimini algılama yeteneğini sensörün duyarlılığı göstermektedir. Sensörün duyarlılığı bağıl nemdeki %1’lik değişime karşı rezonans frekansındaki kayma şeklinde tanımlıdır. Hesaplamalardan soğurucu tabanlı metamalzeme sensörün bağıl nem duyarlılığı 3,87 MHz/BN olarak bulunmuştur. Elde edilen bu değer, Kapton HN bandın sadece elektrik-LC rezonatörün ayrık kısmına konulduğu soğurucu tabanlı olmayan metamalzeme kullanılarak tasarlanan sensörün[4] bağıl nem duyarlılığından 2,3 kat daha büyüktür. Terahertz frekanslarda elektrik-LC rezonatörlü metamalzemenin yüzeyi ipek protein fibroin ile kaplanarak en fazla 0,22 GHz/%BN oranında duyarlılık elde edildiği rapor edilmiştir[16]. Bu değer çalışmamızdan daha yüksek olsa da terahertz bölgesi mikrodalga frekanslardan daha yüksek frekansta olduğundan karşılaştırma yapılabilmesi mümkün değildir. Ekmekçi vd. ayrık halka rezonatöre sahip iki alttaşın arasına bağıl nem değeri %10,5 ile %21,0 arasında değişen nohut unu yerleştirmişlerdir. Mikrodalga dalga kılavuzu kullanılarak yapılan simülasyon sonucunda neme duyarlılığı 12,57 MHz/BN, deney neticesinde ise 20,76 MHz/BN olarak elde etmişlerdir[31]. Fakat nohut unu, çalışmamızdaki polimit film gibi çevresindeki neme karşı dielektrik sabiti çok hassas bir malzeme olmadığından nemli ortamda bir süre bekletilerek ortamın nemi hakkında fikir sahibi olunabilir.

Rezonans frekansındaki kaymanın bağıl nem değişimi ile doğrusal biçimde değişmesi, tasarlanan soğurucu tabanlı metamalzeme sensörün uygulamalar açısından elverişli olduğunu göstermektedir. Rezonans frekans bağıl nem ile doğru orantılı biçimde değişim gösterdiğinden önerilen sensör herhangi bir ortamdaki referans ortama göre olan nem değişimini kolayca algılayabilir.



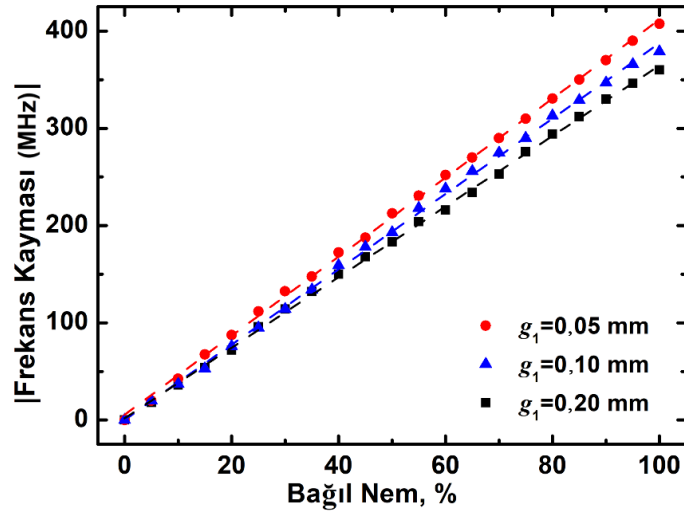
**Şekil 6.** Rezonans frekansındaki kaymasının bağıl nem değişimi ile ilişkisi ( $g_1 = 0,10$  mm ve Kapton HN bant kalınlığı 0,10 mm)

Bu kısımda kapasitif ayrık genişliği  $g_1$ 'in soğurucu tabanlı metamalzeme sensörün duyarlılığına etkisi incelenmiştir. Yapılan incelemeler sonucunda  $g_1$  mesafesinin artırılmasının sensörün duyarlılığına negatif yönde etkisi olduğu görülmüştür.  $g_1$  0,100 mm'den 0,125 mm'ye artırıldığında duyarlılık 3,87 MHz/BN'den 3,73 MHz/BN'ye düşmüştür.  $g_1$  0,150 mm ve 0,200 mm olduğunda ise duyarlılık sırasıyla 3,70 MHz/BN ve 3,60 MHz/BN olarak elde edilmiştir. Öte yandan,  $g_1$  mesafesinin azaltılmasının sensörün duyarlılığına olumlu yönde katkısı olmaktadır.  $g_1$  değeri 0,050 mm'ye düşürüldüğünde bağıl nem duyarlılığı 4,07 MHz/BN'ye artış göstermiştir. Karşılaştırma olması açısından  $g_1=0,20$  mm ve  $g_1=0,05$  mm için duyarlılık grafikleri  $g_1=0,10$  mm ile birlikte Şekil 7'de gösterilmiştir.  $g_1$  aralığının azaltılması ile duyarlılığın artması, ayrık bölgede daha fazla elektrik alan enerjisinin depo edilmesine imkân tanınmasından kaynaklanmaktadır. Bu çalışma ile, metamalzeme tabanlı nem sensörü çalışmaları içerisinde bildiğimiz kadarıyla ilk defa metamalzemedeki rezonatörlerde rezonans frekansında ayrık alanın daraltılması ile artan elektrik alanının sensörün duyarlılığını geliştirdiği sonucuna varılmıştır. Frekans kaymasının geometrik parametreler ile doğrusal olarak değişmesi de istenilir bir özelliktir.



Şekil 7. Rezonans frekans kaymasının bağıl nem değişimi ile ilişkisi

Kapton HN bandın kalınlığı 300  $\mu\text{m}$ 'den fazla olduğunda rezonans frekans değişiklik göstermediğinden ötürü, band kalınlığının nem sensörünün duyarlılığına etkisini incelemek için band kalınlığı 300  $\mu\text{m}$  ve  $g_1=0,05$  mm iken metamalzeme sensörün bağıl nem değişimlerine karşı tepkisi incelenmiştir. Bağıl nem değişimine karşı rezonans frekansın değişim grafiği Şekil 8'de gösterilmiştir. Bağıl nem oranı arttığında etkin dielektrik sabiti arttığı için rezonans frekans değeri azalmaktadır. Bağıl nem oranı %0'dan %100'e değişirken frekanstaki mutlak kayma 412,8 MHz kadar olmaktadır. Frekans kaymasının bağıl nem değişimine göre olan doğrusal fitinden duyarlılık yine 4,07 MHz/BN olarak elde edilmiştir. Bu durum Kapton HN bandın kalınlığının 0,10 mm'den 0,30 mm'ye artırılmasının bağıl nem duyarlılığına etkisinin olmadığını göstermektedir. Neme duyarlı polimit filmin kalınlığının sensörün bağıl nem duyarlılığını etkilememesi, rezonans frekansta elektrik alan ve yüzey akımlarının metamalzeme rezonatörlerinde yoğunlaşmasından ileri gelmektedir.



Şekil 8. Rezonans frekans kaymasının bağıl nem değişimi ile ilişkisi ( $g_1 = 0,05$  mm ve Kapton HN bant kalınlığı 0,30 mm)

#### 4. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışma ile sayısal yöntemler kullanılarak mikrodalga frekanslarda yüksek duyarlılıkta çalışabilen, düşük maliyetli bir bağıl nem sensörü geliştirilmiştir. Sensörün yapısında, elektrik-LC rezonatörlerden oluşan soğurucu tabanlı bir metamalzeme ve neme duyarlı ticari bir bant bulunmaktadır. Geliştirilen sensörün bağıl nem duyarlılığı 3,87 MHz/BN olarak elde edilmiştir. Metamalzeme yüzeyinde elektrik alanın yüksek oranda depolandığı bölgenin daraltılması ile duyarlılığın daha da artırılabileceği ortaya

konulmuştur. Duyarlılık 4,07 MHz/BN'ye artırılmıştır. Neme duyarlı ticari olarak satın alınabilen bir polimit olan Kapton HN bandın kalınlığının 0,30 mm'ye artırılması ise metamalzeme sensörün nem duyarlılığını iyileştirmemiştir. Bu durum, metamalzeme tabanlı sensörlerde duyarlılığın metamalzeme rezonatörleri ile belirlendiği sonucunu doğurmaktadır. Geliştirilen sensör, mikrodalga frekanslarında nem algılama amaçlı kullanılabilir. Bağlı nemin insan vücudundaki biyolojik etkileşimler açısından da oldukça önemli olduğu tespit edilmiştir. Bunun yanında, havadaki nem hava sıcaklığını da belirleyici bir unsurdur. Gıda maddelerinin bozunmadan muhafaza edilmesinde, arşiv odalarında, müzelerde, aşırı kuru ortamlarda oluşabilecek deformasyonun önüne geçilmesinde ortamdaki nem oranını kontrol altında tutabilmek gereklidir. Bu sebeple bağlı nem takibi son derece önemlidir. Çalışmada sunulan metamalzeme sensörü bu bakımdan ekonomik ve pratik bir çözüm olabilir.

### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışma TÜBİTAK tarafından 117E5074 no'lu proje desteği ile desteklenmiştir.

### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] L. N. Gunawardhana, G. A. Al-Rawas, S. Kazama. (2017). An alternative method for predicting relative humidity for climate change studies. *Meteorological Applications*, 24(4), 551-559. Doi: 10.1002/met.1641
- [2] R. Dales, L. Liu, A. J. Wheeler, N. L. Gilbert. (2008). Public health: Quality of indoor residential air and health. *Canadian Medical Association Journal*, 179(2), 147-152. Doi: 10.1503/cmaj.070359
- [3] J. Shaman, M. Kohn. (2009). Absolute humidity modulates influenza survival, transmission, and seasonality. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(9), 3243-3248. Doi: 10.1073/pnas.0806852106.
- [4] E. M. Amin, N. C. Karmakar, B. Winther-Jensen. (2014). Polyvinyl-alcohol (PVA)-based RF humidity sensor in microwave frequency. *Progress in Electromagnetics Research B*, 54, 149-166. Doi:10.2528/PIERB13061716.
- [5] M. Aktaş, T. Menlik, K. Boran, B. Aktekeli, Z. Aktekeli. (2014). Isı pompalı bir kurutucuda portakal kabuğu kurutulması. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 2(2), 229-238.
- [6] E. Ekmekçi, G. Turhan-Sayan. (2007). Investigation of effective permittivity and permeability for a novel V- shaped metamaterial using simulated S-parameters. *Proceedings of the 5th International Conference on Electrical and Electronics Engineering*, 251-254.
- [7] R. Melik, E. Unal, N. K. Perkgoz, C. Puttlitz, H. V. Demir. (2009). Flexible metamaterials for wireless strain sensing. *Applied Physics Letters*, 95(18), 181105. Doi: 10.1063/1.3250175
- [8] I. Y. Abdulkarim, L. Denga, O. Altıntaş, E. Ünal, M. Karaaslan. (2019). Metamaterial absorber sensor design by incorporating swastika shaped resonator to determination of the liquid chemicals depending on electrical characteristics. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 114, 113593. Doi: 10.1016/j.physe.2019.113593
- [9] W. Zhang, J. Y. Li, J. Xie. (2018). High sensitivity refractive index sensor based on metamaterial absorber. *Progress in Electromagnetics Research M*, 71, 107-115. Doi: 10.2528/PIERM18042903.
- [10] R. Melik, E. Unal, N. K. Perkgoz, C. Puttlitz, H. V. Demir. (2009). Flexible metamaterials for wireless strain sensing. *Applied Physics Letters*, 95(18), 3-5. Doi: 10.1063/1.3250175
- [11] R. Melik, E. Unal, N. K. Perkgoz, B. Santoni, D. Kamstock, C. Puttlitz, H. V. Demir. (2010). Nested metamaterials for wireless strain sensing. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 16(2), 450-458. Doi: 10.1109/JSTQE.2009.2033391

- [12] X. Yang, D. Zhang, S. Wu, Y. Yin, L. Li, K. Cao, K. Huang. (2017). Reconfigurable all-dielectric metasurface based on tunable chemical systems in aqueous solution. *Scientific Reports*, 7, 3190. Doi: 10.1038/s41598-017-03439-9
- [13] G. Kiti, V. Radoni, V. Crnojevi-Bengin. (2012). Soil moisture sensors based on metamaterials. *Songklanakarin Journal of Science and Technology*, 34(6), 689-693.
- [14] Z. Chen, M-C. Jin, C. Zhen. (1990). Humidity sensors with reactively evaporated Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> films as porous dielectrics. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2(3), 161-171. Doi: 10.1016/0925-4005(90)85001-F
- [15] G. Garcia-Belmonte, V. Kytin, T. Dittrich, J. Bisquert. (2003). Effect of humidity on the AC conductivity of nanoporous TiO<sub>2</sub>. *Journal of Applied Physics*, 94, 5261-5264. Doi: 10.1063/1.1610805
- [16] H. S. Kim, S.H. Cha, B. Roy, S. Kim, Y.H. Ahn. (2018). Humidity sensing using THz metamaterial with silk protein fibroin. *Optics Express*, 26(26), 33575-33581. Doi: 10.1364/OE.26.033575
- [17] Kapton Polyimide Film, [Online]. Mevcut: <https://en.wikipedia.org/wiki/Kapton> [Erişim: 10 Mart 2020].
- [18] J. Virtanen, L. Ukkonen, T. Björninen, A. Z. Elsherbeni, L. Sydänheimo. (2011). Inkjet-printed humidity sensor for passive UHF RFID systems. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 60(8), 2768. Doi: 10.1109/TIM.2011.2130070
- [19] N. I. Landy, S. Sajuyigbe, J. J. Mock, D. R. Smith, W. J. Padilla. (2008). Perfect metamaterial absorber. *Physical Review Letters*, 100, 207402. Doi: 10.1103/PhysRevLett.100.207402
- [20] D. Schurig, J. J. Mock, D. R. Smith. (2006). Electric-field-coupled resonators for negative permittivity metamaterials. *Applied Physics Letters*, 88, 041109. Doi: 10.1063/1.2166681
- [21] W. Withayachumnankul, C. Fumeaux, D. Abbott. (2010). Compact electric-LC resonators for metamaterials. 18, 25912-25921. Doi: 10.1364/OE.18.025912
- [22] M. W. Zayed, M. Shafuzzaman, M. O. Goni. (2014). ELC resonator based narrow band metamaterial absorber. *Proceedings of the 8th International Conference on Electrical and Computer Engineering*, 564-567. Doi: 10.1109/ICECE.2014.7026986
- [23] S. Fallahzadeh, K. Forooghi, Z. Atlasbaf. (2012). A polarization-insensitive metamaterial absorber with a broad angular band. *Proceedings of the 20th Iranian Conference on Electrical Engineering*, 1540-1543. Doi: 10.1109/IranianCEE.2012.6292603
- [24] D. H. Luu, N. V. Dung, P. Hai, T. T. Giang, V. D. Lam. (2016). Switchable and tunable metamaterial absorber in THz frequencies. *Journal of Science: Advanced Materials and Devices*, 1, 65-68. Doi: 10.1016/j.jsamd.2016.04.002
- [25] J. Zhou, E. N. Economou, T. Koschny, C.M. Soukoulis. (2006). Unifying approach to left-handed material design. *Optics Letters*, 31(24), 3620-3622. Doi: 10.1364/OL.31.003620
- [26] A. Dhouibi, S. N. Burokur, A. Lustrac, A. Priou. (2012). Study and analysis of an electric Z-shaped meta-atom. *Advanced Electromagnetics*, 1(2), 64-70. Doi: 10.7716/aem.v1i2.82
- [27] A. Ebrahimi, W. Withayachumnankul, S. F. Al-Sarawi, D. Abbott. (2014). Dual-mode behavior of the complementary electric-LC resonators loaded on transmission line: Analysis and applications. *Journal of Applied Physics*, 116(8), 1-7. Doi: 10.1063/1.4893751
- [28] H. Li, L. H. Yuan, B. Zhou, X. P. Shen, Q. Cheng, T. J. Cui. (2011). Ultrathin multiband gigahertz metamaterial absorbers. *Journal of Applied Physics*, 110(1), 014909. Doi: 10.1063/1.3608246

- [29] H. Tao, C. M. Bingham, A. C. Strikwerda, D. Pilon, D. Shrekenhamer, N. I. Landy, K. Fan, X. Zhang, W. J. Padilla, R. D. Averitt. (2008). Highly flexible wide angle of incidence terahertz metamaterial absorber: Design, fabrication, and characterization. *Physical Review B*, 78, 241103. Doi: 10.1103/PhysRevB.78.241103
- [30] B. Ni, Z.Y. Wang, R. S. Zhao, X. Y. Ma, Z. Q. Xing, L. S. Yang, L. J. Huang, Y. Y. Lin, D. B. Zhan. (2017). Realisation of a humidity sensor based on perfect metamaterial absorber. *Optical and Quantum Electronics*, 49, 33. Doi: 10.1007/s11082-016-0858-6
- [31] E. Ekmekci, U. Kose, A. Cinar, O. Ertan, Z. Ekmekci. (2019). The use of metamaterial type double-sided resonator structures in humidity and concentration sensing applications. *Sensors and Actuators A: Physical* 297, 111559. Doi: 10.1016/j.sna.2019.111559

## Investigation of Power Quality in a System Based on Renewable Energy Sources

 Mehmet Rıda TÜR<sup>1</sup>, \*  Fatma YAPRAKDAL<sup>2</sup> 
<sup>1</sup>Batman University, Technical Sciences Vocational School, Department of Electricity and Energy, 72050, Batman /Turkey

<sup>2</sup>Akdeniz University, 07070 Antalya/Türkiye

### Graphical/Tabular Abstract

#### Article Info:

Research article  
 Received: 17/04/2020  
 Revision: 12/06/2020  
 Accepted: 03/07/2020

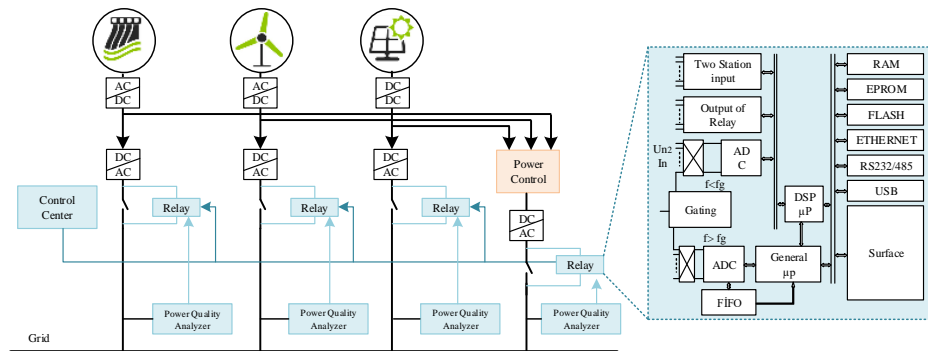
#### Highlights

- LabVIEW
- ADALINE
- Dynamic Methods

#### Keywords

Power Quality  
 Distributed Energy  
 Renewable energy sources  
 Microgrid  
 Protection Relay

In this study, technological developments that can be made for the development of the network infrastructure by providing an overview of these dynamic new situations changes in classical and smart networks, stabilizers, relay design, control technologies, power quality analysis and monitoring. It also focuses on topologies and control methods for energy quality regulators in power systems, especially applicable control technologies in distributed power plants according to the new features of power quality. Finally, the trends and expectations of power quality monitoring technology, which are important for reliable and efficient operation in smart grids, are presented.



**Figure 1.** Power mains ports and protection relay analyzer with protection functions

**Purpose:** In this study, the power quality problem has become an important issue to be addressed in modern electrical networks. It requires global solutions to monitor and diagnose power quality to prevent and detect failures. Thus, large amounts of heterogeneous information must be transferred and processed very quickly and automatically to provide useful information and answers to power quality problems.

**Theory and Methods:** The impact factor of fluctuations in power quality has also been analyzed. LabVIEW, a monitoring and analysis tool, has also been developed. As mentioned earlier, harmonics threaten the power quality of the electrical grid and damage the safety of the equipment. Harmonic signals need to be balanced to improve power quality.

**Results:** A comprehensive analysis of quality-oriented solutions and relay systems in power systems has been made. The vision is for this analysis to serve as a resource for control theorists and power engineers to work together and create a sustainable and secure future for the supply of electrical power in every corner of the world. A content of open questions for future work is provided.

**Conclusion:** It has been determined that power quality monitoring techniques are mainly used to monitor harmonics, but relay systems and ADALINE are the most effective monitoring techniques. In addition, approaches to the fact that static and dynamic methods are economically distributable in power systems are analyzed. In addition, it is aimed to prepare infrastructures for the use of different technologies, which are preferred to use the latest methodologies or techniques used to monitor power quality events and parameters, communication and control techniques for different power quality problems.



## Yenilenebilir Enerji Kaynaklarına Dayalı Bir Sistemde Güç Kalitesinin İncelenmesi

Mehmet Rıda TÜR<sup>1</sup>, \* Fatma YAPRAKDAL<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Batman Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, Elektrik ve Enerji Bölümü, 72050, Batman /Türkiye

<sup>2</sup>Akdeniz Üniversitesi, 07070 Antalya/Türkiye

### Öz

Güç sistemlerinde şebekeye bağlı doğrusal olmayan elektriksel yükler pratikte güç elektroniği devre elemanları üzerinde önemli ölçüde güç kalitesi sorunları oluşturmaktadır. Artan enerji talebine bağlı olarak yenilenebilir enerjinin kurulu güçteki üretim oranındaki artış günden güne bu etkilerin giderek daha ciddi boyutlara ulaşmasına sebep olmaktadır. Enerji kalitesi konusunda yapılan bu detaylı çalışma ile genel olarak teoride ve pratikte enerji kalitesi izlemenin büyük bir önem taşıdığı vurgulanmıştır. Bu çalışma, klasik ve akıllı şebekelerde bu dinamik değişimler karşısında dengeleyiciler, röle tasarımı, kontrol teknolojileri, güç kalitesi analizi ve izlemesine genel bir bakış sunarak şebeke alt yapısının gelişimine yönelik yapılabilecek yatırımlara ve teknolojik katkılara ışık tutmayı hedeflemektedir. Ayrıca, güç sistemlerinde enerji kalitesi düzenleyicilerine yönelik topolojilere ve kontrol yöntemlerine, özellikle de güç kalitesinin yeni özelliklerine göre dağıtılmış enerji santrallerinde uygulanabilir kontrol teknolojilerine odaklanmaktadır. Son olarak, akıllı şebekelerde güvenilir ve verimli çalışma için önemli olan güç kalitesi izleme teknolojisinin eğilimleri ve beklentileri sunulmuştur.

### Makale Bilgisi

*Araştırma makalesi*  
*Başvuru: 17/04/2020*  
*Düzeltilme: 12/06/2020*  
*Kabul: 03/07/2020*

### Anahtar Kelimeler

*Güç kalitesi*  
*Dağıtık Enerji*  
*Yenilenebilir enerji kaynaklar*  
*Mikro şebeke*  
*Koruma Rölesi*

### Keywords

*Power Quality*  
*Distributed Energy*  
*Renewable energy sources*  
*Microgrid*  
*Protection Relay*

### Investigation of Power Quality in a System Based on Renewable Energy Sources

#### Abstract

In the power systems, non-linear electrical loads connected to the grid in practice pose significant power quality problems on power electronics circuit elements. Due to the increasing energy demand and the increase in the production rate of renewable energy in installed power, these effects are becoming more and more serious day by day. With this in-depth study of energy quality, studies in general emphasized that monitoring energy quality in theory and practice is of great importance. This study aims to shed light on the investments and technological developments that can be made for the development of the network infrastructure by providing an overview of these dynamic new situations changes in classical and smart networks, stabilizers, relay design, control technologies, power quality analysis and monitoring. It also focuses on topologies and control methods for energy quality regulators in power systems, especially applicable control technologies in distributed power plants according to the new features of power quality. Finally, the trends and expectations of power quality monitoring technology, which are important for reliable and efficient operation in smart grids, are presented.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Güç kalitesi sorunu, yapılan incelemenin türüne veya sisteme entegre olan bileşenin etkisine bağlı olarak değişebilir. Örneğin bir elektrik santralının güç kalitesi, elektrik enerjisinin güvenilir bir şekilde iletimi olarak tanımlanabilir. Ancak santralin üretim gücü, cihazın öngörülen şekilde çalışması için gerekli olan elektrik enerjisini verimli bir şekilde sağlamasına bağlıdır. Ayrıca elektrik enerjisi üretiminde kalite, temelde elektrik enerjisi tüketicileri için sağlanması nedeniyle sürdürülebilir ve kesintisiz bir şekilde sunulması prensibine dayandırılır. Bu nedenle, güç kalitesi sorunu "son tüketiciye ait cihazların arızasına veya çalışmamasına neden olacak gerilim, akım ve frekanstaki dengesizlikler" olarak tanımlanabilir.



Güç kalitesi ile ilgili en önemli sorun, genellikle gerilim genliğinde değişiklikler gösteren gerilim dalgalanmalarıdır. Normal tolerans seviyelerinin ötesinde gerilimde ani bir artış anlamına gelen bu problem, besleme gerilimi genliğinde azalmaya işaret etmektedir [1] ve sorunun birçok varyasyonu bulunmaktadır. Genel olarak, gerilimdeki en uzun süreli bozulma birkaç saniyeden az sürmektedir [2]. Bunun ana nedeni, dalgalanmalar gibi ani değişikliklerdir ve gerilim, akım veya her ikisi de sabit bir durumda olması olabilmektedir.

"Güç kalitesi" terimi, üretilen elektrik enerjisinin güvenilirliğini ve elektrik iletim ve dağıtım şebekelerinde ölçülen gerilim ile akım büyüklüklerinin ideal özelliklerini ifade eder. Bu terim aynı zamanda, ortaya çıkabilecek aksaklıklar neticesinde, müşteri ve bağlı ekipman üzerinde oluşan olumsuz etkiler ve istenmeyen tüm sapmaları da içermektedir. Güç kalitesinin bir başka sorunu da uzun süreli gerilim kesintileridir. Yaklaşık birkaç milisaniye seviyesinde olan akımdaki toplam kesinti veya azalma durumu, veri işleme sürecinde doğrudan hataya neden olmaktadır. Ayrıca, sistemlerdeki diğer bir yaygın problem, distorsiyon olarak tanımlanan bozulmalarıdır. Bu sorun, güç sisteminin ana dalga formu ile çakışan ve sistemde veri kaybına neden olan yüksek frekanslı sinyaller olarak tanımlanır [3]. Flicker olarak tanımlanan bir diğer sorun ise, güç kaynağından nominal değerinin %90-110'u arasındaki gerilimin dalgalanmalarıdır ve genellikle sistemin yük tarafına zarar vermektedir [4]. Güç sistemlerinde yaşanan kesintiler, her durumda uzun süre çalışan ve sıfır gerilim durumlarıdır. Bunun nedeni ise, bir elektrik sisteminde devrenin enerjisiz kalması ve güç dağıtımının kesintiye uğraması veya şebeke elektriğinin kesintiye uğraması olabilmektedir. Bir kesinti durumu, doğrudan veri kaybına, kalite bozulmasına ve sistemde kullanılan ekipmanda hasara yol açması kaçınılmaz bir durumdur [5]. Bu kesintiler genellikle iki gruba ayrılır; kısa süreli kesintiler ve uzun süreli kesintiler. Enerji kaynağı birkaç milisaniyeden bir veya iki saniyeye kadar bir sürede devre dışı olursa kısa kesintiler meydana gelir. Bunun nedeni genellikle koruma cihazlarının açılması ve şebekenin hatalı bir kısmını devre dışı bırakmak gibi durumlardır. Ancak büyük kesintiler daha ciddi olarak büyük hatalara neden olur ki bunlar; yalıtım arızası, yıldırım ve izolatör bozulmalarıdır [6]. Diğer yandan, güç kaynağının 1 ila 2 saniyeden daha uzun sürmesi durumunda güç sistemi şebeke donanımı bozulması, fırtınalar ve/veya diğer çevresel etmenlerden kaynaklı kesinti meydana gelirse, sistemdeki ekipmanların çalışması tamamıyla durdurulabilmektedir [7].

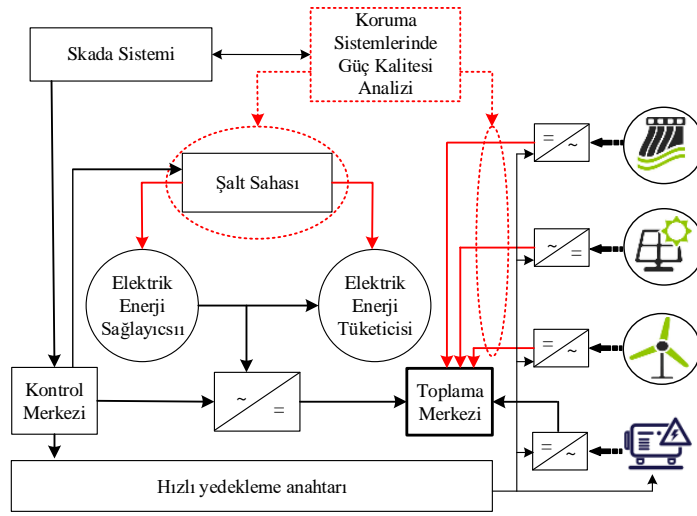
Yenilenebilir enerji kaynaklarının (YEK) toplam enerji dengesindeki artan payı karşısında, son kullanıcıya yeterli enerji kalitesi ve enerji güvenliği sağlama zorunluluğu getirmektedir. Bu sorun, tek tek Avrupa ülkelerinin hükümetleri ve Avrupa Komisyonu tarafından kabul edilen birçok belge ile vurgulanmıştır. Modern akıllı şebekelerde, yüklerin çeşitliliği ve yüksek verimli tüketim taleplerinin yanı sıra güç elektroniği ara yüzleri üzerinden YEK'e dayalı üretim ve şebeke bağlantı teknolojisinin kullanılması, güç kalitesini yönetmede büyük zorluklar yaratmıştır [8-12]. Çeşitli enerji kaynaklarının ve tüketicilerin şebekeye Şekil 1'de sunulan genel şema, başarılı bir şekilde entegrasyonu, elektrik satmak isteyen enerji satıcılarının ve elektriği ekonomik olarak verimli bir şekilde kullanmak isteyen tüketicilerin taleplerinin karşılanmasını gerektirir. Şebeke dengelenmeli ve müşteriye sağlanan enerji kalite standartlarını karşılamalıdır. Ayrıca, tüketicilere gerekli elektriği sağlama ihtiyacı, güç kalitesini izleme gereksinimini de beraberinde getirir. YEK'leri güç dağıtım şebekelerine dahil ederken, şebekedeki birçok düğüm noktasında güç kalitesi analizi sağlamak çok önemlidir.

Bu çalışmada, dağıtık enerji kaynaklarına sahip güç şebekelerinde güç kalitesi izleme ile ilgili temel olarak üç önemli konu bulunmaktadır. Bunlar, mevcut elektrik şebekesinin yapısı, gerilim bozulmalarının ve şebeke bileşenlerinin bozulmaya yatkınlığı olarak tanımlanmaktadır. Herhangi bir düğüm noktasında güç kalitesi izlemesinin gerekli olduğuna dair sonuçlar çıkarılarak, efektif bir kontrol mekanizması tasarlanması hedeflenmektedir. Ayrıca, güç kalitesi analiz fonksiyonlarını koruma rölesine entegre etmek için gerekli teknik çözümler açıklanmıştır.

## **2. YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARINDA GÜÇ KALİTESİ (POWER QUALITY IN RENEWABLE ENERGY SOURCES)**

Güç kalitesi, özellikle 90'lı yılların başından beri önemli bir konu haline gelmiştir ve günümüzde kamu hizmetleri, ekipman üreticileri ve müşteriler için bir endişe kaynağıdır. Güç kalitesine ilginin artmasına farklı faktörler katkıda bulunmuştur. Bunlar aşağıda özetlenmektedir:

- Ekipmanlar yaşanan bozulmalara karşı daha hassastır (özellikle bilgisayarlar, işlemci ve dijital elektronikler).
- Güç elektroniği dönüştürücülerini içeren cihazlar, doğrusal olmayan davranışlarından dolayı daha fazla harmonik bozukluğa neden olmaktadır.
- Nihai tüketici artık sadece bir yük değil, bir müşteri ve elektrik enerjisi kullanıcısı olarak, bazı kalite gereksinimlerini karşılaması gereken bir taraftır, bunun için yeni düzenlemeler gereklidir.
- Dağıtılmış enerji üretim sistemlerinin (yenilenebilir enerji kaynakları gibi) piyasaya sürülmesinden dolayı elektrik şebekesindeki karmaşık yapı büyük bir şekilde artmaktadır ve piyasa liberalleştirilmektedir, bu da piyasadaki aktör sayısını arttırmaktadır.

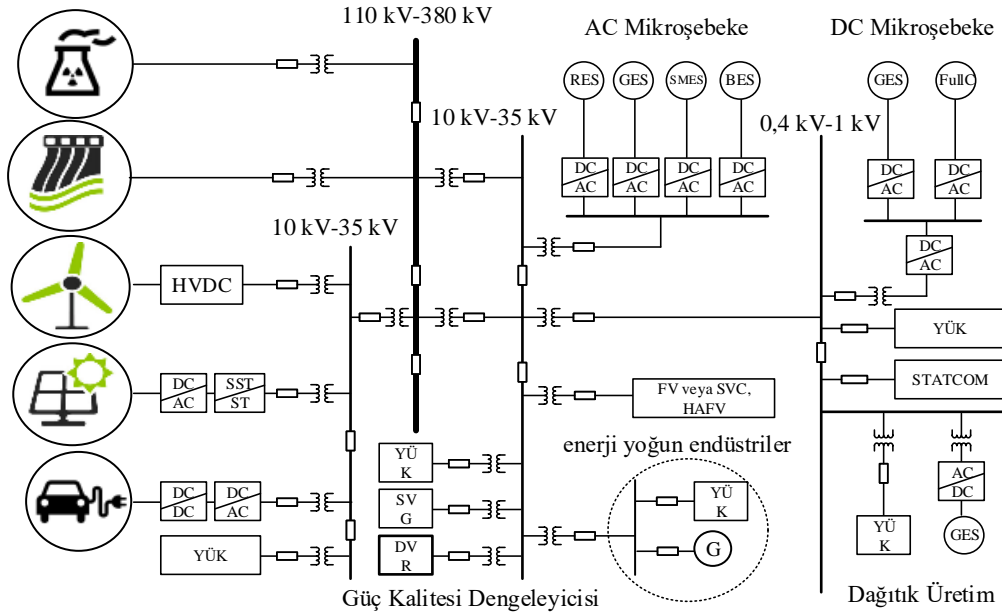


**Şekil 1.** Dağıtılmış yenilenebilir enerji kaynaklarını ve entegre bir koruma, izleme ve kontrol sistemi

YEK'lerin doğası gereği, güneş panelleri ile bir Doğru Akım (DA) gerilimi ve süper kapasitörler şeklinde enerji sistemleri veya rüzgar türbinleri ve dalga türbinleri gibi değişken frekanslı bir Alternatif Akım (AA) gerilimi üretmesi kaçınılmaz bir problemdir [13,14]. YEK'lere dayalı üretilen enerjilerinin şebekeye enjekte edilebilmesi için senkronize edilmesi gerekir veya dengeli bir alternatif akıma dönüştürülmesi gerekmektedir. AA-DA dönüşümü ve DA-AA dönüşümü sağlayan invertörler, dönüştürme işlemi sırasında harmonik, gerilim sarkması ve aşma şeklinde kontrol bozuklukları ortaya çıkmaktadır. Ayrıca, güç şebekelerine bağlı olan birçok yük, çekilen akımın fider gerilimi ile doğrusal olmayan bir bağımlılık oluşmaktadır. Bu doğrusal olmayan yük durumu, şebekeye enjekte edilen daha yüksek akım harmoniklerinin oluşmasına neden olmaktadır. Ayrıca, iletim hatlarında empedans sıfır olmadığından dolayı gerilim harmonikleri ortaya çıkmaktadır. Özellikle önemli olan, bu harmoniklerin şebekeye bağlı ekipman üzerindeki olası olumsuz etkilerinin ölçülmesi ve analizinin yapılmasıdır. Fakat fider bazlı gerilimdeki harmonik içeriğini ölçen güç kalitesi analizörleri, YEK'lerin şebekeye bağlandığı her noktada uygulanamayacak kadar yüksek bir maliyet gerektirmektedir. Diğer yandan, dağıtılmış yenilenebilir üretimin güç koşullandırması için süper kapasitörlere dayanan basit bir güç yumuşatma stratejisi ile yapılmaktadır [15,16]. Enerji yönetim sistemlerinde rüzgar hızı tahmini ve güç kalitesine entegre değerlendirmeler, analitik ölçüm teknolojisine dayalı enerji yönetim sisteminin inşası dahil olmak üzere hibrid YEK'lere optimum yönetilen bir katman olarak önerilmektedir [17-19]. Güç şebekesi yönetiminin artan karmaşıklığı, artan şebeke güvenilirliği, verimlilik ve güvenlik gibi endişeler yapının akıllı şebekeye doğru ilerlemesinde büyük adımları tetiklenmiştir [20]. Akıllı şebekeler geleneksel güç sistemi ile karşılaştırıldığında, çeşitli enerji girişleri, çoklu yük özellikleri ve çeşitli enerji dönüşüm teknolojilerini birleştiren mikro şebeke veya dağıtılmış enerji santrali, kimyasal enerji, termodinamik ve elektrodinamiklerin birbirine bağlanması ile doğrusal olmayan ve karmaşık bir sistem olduğu bilinmektedir. Mikro şebekeler, dağıtılmış enerji üretim sistemleri entegrasyonu ve güç kalitesini güvence altına alma gibi kritik yüklere enerji güvencesi sağlama gereksinimi nedeniyle dikkat çekmektedir [21-23].

Doğal kaynakların sınırlandırılması için, dağıtık generatörlerin (DG) karmaşıklık, çeşitlilik ve istikrarsızlık özellikleri oluşmaktadır. Buna göre, güç kalitesinin korunmasında yeni özelliklerle ilgili bazı yeni sorunlar

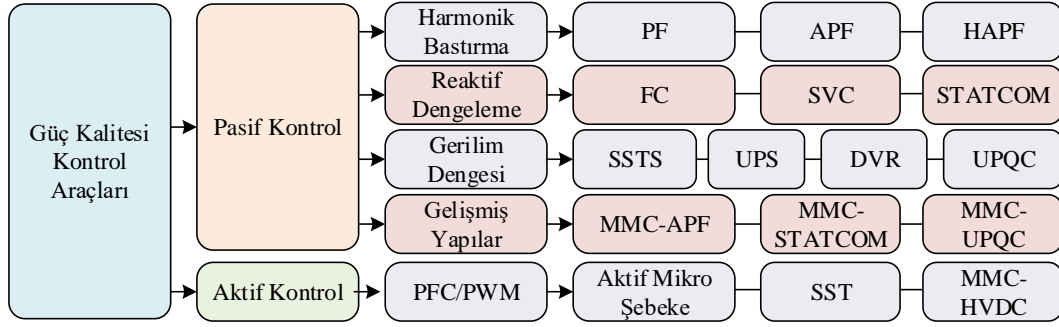
ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle, güç kalitesi kontrol teorisi ve teknolojisi, mikro şebekeler veya dağıtılmış enerji santralleri bağlandığında güç şebekesinin istikrarlı ve güvenli çalışmasını sağlamada önemli bir rol oynayacaktır. Uzun ve orta vadeli bilimsel ve teknolojik gelişim için Çin ulusal programında (2006-2020), özellikle enerji kalitesi için analiz, tespit ve kontrol teknolojisinin enerji alanında öncelikli bir hedef olması gerektiği belirtilmektedir. Yüksek güçlü güç elektroniği teknolojisi uygulamasını teşvik etmek ve güç kalitesini aktif olarak kontrol etmek için önerilir. Güç kalitesi kontrolleri de dahil olmak üzere akıllı şebekenin tipik yapısı Şekil 2’de gösterilmektedir. Bu sistem temel olarak üç bölüme ayrılmıştır, bunlar; güç iletim kısmı, güç dağıtım kısmı ve güç tüketimi kısmıdır. İletim şebekesi, bölgesel güç elektrik kaynağından ve büyük yenilenebilir enerji üretimi iletiminden sorumlu olan kısımdır. Sistemin birincil amacı, yüksek gerilim güç kalitesini dengeleyicileri tarafından sağlanan uygun reaktif güç ile düzenleyerek iletim hatlarının gerilim stabilitesini korumaktır. Yüksek ve orta gerilim dağıtım şebekesi, iletim şebekesini ve güç tüketicilerini birbirine bağlayan bir köprü görevi görmektedir. Çok miktarda dağıtılmış enerjinin bağlantısıyla, güç kalitesi özellikleri yüksek penetrasyon ve stokastik performans göstermektedir. Sonuç olarak, uygun bir güç kalitesi sağlamak için birden fazla destekleyici cihazın birlikte çalışması önerilmektedir. Tüketici tarafında güç kalitesi, güç verimliliğini ve üretim güvenliğini doğrudan etkiler, bu da güç kalitesi sorunlarını daha karmaşık hale getirmektedir. Sonuç olarak, aktif kontrol ve yerel dengeleme teknolojisi, dolaşımdaki akımı veya harmonik rezonansı baskılamak ve dağıtım şebekesindeki DG’ler ve elektrik yükleri arasındaki emisyon özelliklerini analiz etmek için iki önemli teknik olarak bilinmektedir.



Şekil 2: Mikroşebeke ve Dağıtık Üretim içeren genel bir dağıtım şebeke sisteminin diyagramı

### 3. GÜÇ KALİTESİ DENGELEYİCİLERİNİN SINIFLANDIRILMASI (CLASSIFICATION OF POWER QUALITY COMPENSATORS)

Güç kalite kontrol teknolojilerinden yararlanılarak, tüketici tarafında güç kalitesinin iyileştirilmesi oldukça önemlidir. Güç kalite kontrolünün temel ilkesi, kalite uyumu ve optimum verimlilik gereksinimini karşılamak üzere elektrik enerjisini kontrol etmek ve dönüşümünü sağlamaktır. Söz konusu kontrol ve dönüştürmeyi gerçekleştirmek için kullanılan anahtar unsurlar, çeşitli güç elektroniği cihazları ve ilişkili kontrol devreleridir. Güç dengeleyicilerin farklı kalite problemleri açısından sınıflandırılması Şekil 3’te gösterilmektedir. Güç kalite kontrol teknolojisi, temelde aktif kontrol teknolojisi ve pasif kontrol teknolojisi olarak ikiye ayrılabilir.



**Şekil 3:** Güç kalitesi dengeleyicilerinin sınıflandırma diyagramı

Pasif kontrol teknolojisi, mevcut güç kalitesi sorunlarının etkisini ortadan kaldırmak veya hafifletmek için ekstra cihazlar eklenmesi ile karakterize edilmektedir. Günümüzde harmonikleri azaltma teknikleri esas olarak pasif güç filtresi (PGF) [18,24], aktif güç filtresi (AGF) [25, 26] ve hibrid aktif güç filtresi (HAGF) [27,28] tekniklerini içermektedir. [29] 'da belirtildiği gibi, HAGF tek rezonans enjeksiyon hibrid aktif güç filtresi, çift rezonans enjeksiyon hibrid aktif güç filtresi ve çok dallı enjeksiyon hibrid aktif güç filtresi olarak sınıflandırılabilir. HAGF, PGF ve AGF'nin avantajlarını birleştirerek, entegre filtre sisteminde tatmin edici performanstan ödün vermeden aktif kontrolün nominal kapasitesini ve gerilimini etkili bir şekilde azaltır. Gerilimin dağıtım şebekesinde harmonik akımları bastırması, reaktif gücü dengelemesi için etkili bir yöntemdir. Reaktif güç dengeleyici ise, gerilim dalgalanması ve titremeyi baskılayabilir. Dağıtım şebekesinde kullanıma hazır değişken dengeleyicileri arasında sabit kapasitör (SK) [30, 31], statik değişken dengeleyiciler (SDD) [32,33] ve statik senkron dengeleyiciler (STATCOM) [34,35] bulunur. Bu cihazlar arasında STATCOM, şebeke gerilimi dalgalanması bastırma ve dengesiz yük dengeleme gibi çoklu fonksiyonlara sahip olduğu için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu eğilim, yüksek kararlılık, güvenilirlik ve güç yoğunluğu nedeniyle modüler harmonik bastırma ve VAR telafi sistemleri geliştirmeye yönelik olmuştur. Geçici güç kalitesi problemleri arasında gerilim düşmesi ve kısa süreli kesinti en yaygın ve zararlı formlar olarak algılanmaktadır. Katı hal transfer anahtarı (KHTA) gerilim düşüşünün derinliğini ve süresini etkili bir şekilde azaltabilir [36,37]. Kesintisiz güç kaynağı (UPS), dağıtım şebekesindeki düşük güçlü cihazlar için gerilim dalgalanmalarını sınırlamak için en etkili araçtır [38,39]. Dinamik gerilim regülatörü (DGR) anlık gerilim düşüşünü ve yükselmesini doğrudan ve hızlı bir şekilde telafi edebilir [40,41]. APF ve AGF serilerinden oluşan birleşik güç kalitesi kontrolörü (UPQC) şebeke için gerilim ve akımın kapsamlı telafisini yapabilir [42,43]. Modüler çok seviyeli dönüştürücüye (MSD) dayalı kademeli güç dönüştürücüler bilimsel araştırmalarda ve mühendislik uygulamalarında yaygın olarak incelenmiştir. Aynı modül yapısı nedeniyle MSD, yüksek ve orta gerilim dönüştürücülerin üretim zorluklarını ve maliyetini büyük ölçüde azaltır. Geleneksel güç kalitesi dengeleyicileri ile karşılaştırıldığında, MSD bazlı dengeleyiciler standardizasyon, genişletilebilirlik, yedeklik, hata geçişi, gerilim seviyesi ve filtreleme gereksinimi gibi özel avantajları vardır [44,45]. Bir yandan, modüler güç kalitesi dengeleyici, alt modüldeki güç anahtarının ve enerji depolama elemanının nominal gerilimini etkili bir şekilde azaltabilir, bu da düşük maliyetli anahtarlama cihazlarının kullanımına izin verir. Diğer taraftan, kademeli yapı, orta ve yüksek gerilim iletim sistemlerinde çeşitlendirilmiş güç kalitesi dengeleyicisinin uygulamasını doğrudan genişletir. Halen MSD'ye dayalı AGF, STATCOM, UPQC başlangıç düzeyinde tartışılmaktadır [46-49]. Yeni topolojiler nedeniyle, geleneksel güç dönüştürücülerinden farklı birçok yeni sorunun ele alınması gerekmektedir. Daha doğrusu, çok seviyeli yapı kaçınılmaz olarak karmaşık bir kontrol sistemi gerektirir, çünkü büyük miktarlarda veri kısa sürede işlenmelidir. Bu, güç kalitesi kontrolü alanında MSD'nin mühendislik uygulamasını ve geliştirilmesini sınırlar.

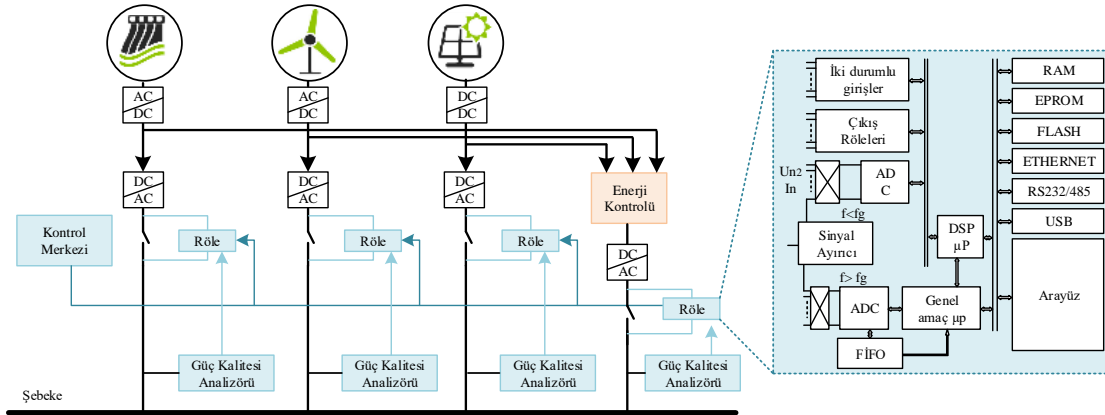
Aktif kontrol teknolojisi, çoğu güç kalitesi problemini önlemek için şebeke ekipmanının empedans özelliklerini geliştirmek için kullanılır. İletim ve dağıtım şebekesi bileşenleri, birbirine bağlı ve akıllı olacağından, gelecekteki elektrikli ekipmanların, özellikle de güç elektroniği dönüştürme sisteminin neden olduğu güç kalitesi sorunları önemli ölçüde azaltılacaktır. Şu anda, güç faktörü düzeltilmesi ve darbe genişlik modülasyonu teknolojisi doğrudan cihazların güç kalitesini artırmıştır [50,51]. Aktif kontrol kullanan dağıtılmış üretim ve mikro şebeke invertörleri sadece dağıtılmış sistemdeki çıkış gerilimi ve akım kalitesini artırmakla kalmaz, aynı zamanda bağlantılı şebeke için bir miktar ilave dengeleme kapasitesi sağlar [52,53]. Ayrıca, potansiyel katı hal transformatörü, güç tüketici tarafı ile güç dağıtım tarafı arasındaki güç

kalitesi sorunlarının iletimini ve emisyonunu engelleyecektir. MSD tabanlı yüksek gerilim doğru akım (YGDA) iletimi ve çok terminalli YGDA teknolojisi sayesinde tüm güç şebekesinin güç kalitesi seviyesi artırılabilecektir. Bunların göze çarpan en önemli özellikleri, yani modülerlik ve ölçeklenebilirlik nedeniyle MTDC ve DA şebekeleri için temel yapı taşı haline gelmiştir. Bu nedenle, MSD tabanlı MTDC sistemleri, sistem performansını iyileştirmek için mevcut güç sistemine yaygın olarak yerleştirilmelidir [54-58]. Elektrik üretim endüstrisinin serbestleştirilmesi ve elektrik enerjisinin rekabetçi piyasalara girişi, yan hizmetlerin oluşumunu zorunlu kılmıştır. Bu hizmetlerin amacı, elektrik arz güvenilirliğini ve kalitesini korumaya yardımcı olmak ve özellikle frekans kontrolünü sağlamaktır. Bu kontrol, üretim ve tüketim arasındaki dengeyi sağlamak amacıyla aktif gücün belirli bir oranda rezerv tutulması ile sağlanır. Sağlanan bu rezerv gereksiniminin ekonomik analizinde yük alma ve yük atma faaliyetleri dikkate alınarak değerlendirilmeler yapılmaktadır [59].

### 3.1. Güç Kalitesi Dengeleyici Koruma Rölesi İşlevlerinin Entegrasyonu (Integration of Power Quality Compensators Protection Relay Functions)

Güç kalitesi analizörü ile entegre koruma rölesinin geliştirilmesindeki ana sorun, 2 kHz'e kadar harmonik ve harmonik içerikli hat gerilim ve akım sinyalleri frekans spektrumu belirlemesi için verimli algoritmaların hazırlanması gerekliliğidir. Güç kalitesi izlemenin kullanımı, güç kalitesi analiz fonksiyonlarının koruma rölesine dahil edilmesini son kullanıcı için ihmal edilebilir. Bu nedenle, ek donanımın maliyeti, yazılıma eklenen ekstra işlevsellik yükü ile mümkün olduğunca düşük olmalıdır.

Güç kalitesi izleme ve kontrol probleminin çözümü, geleneksel koruma rölelerini güç kalitesi analiz fonksiyonları ile donatmak ile sağlanmaktadır. Şebekeye dahil olan tüm cihazların bağlantı noktalarındaki durumu Şekil 4'te işaretlenmiş eviricilerin çıkışında kırmızı renk olarak işaretlenmiştir. DSP mikroişlemci teknolojisindeki büyük ilerleme, son kullanıcı için çok küçük bir ek maliyetle güç kalitesi analiz yazılımının, özellikle harmoniklerin ve düzeylerinin belirlenmesini uygulanmasını sağlar. Dijital alanda sinyali yeniden örnekleme gibi gelişmiş sinyal işleme algoritmaları tasarım hedeflerine ulaşmasını sağlayarak analizin yapılmasına olanak sağlanmaktadır. Geliştirilen koruma rölesinin maliyetini düşük tutmak için, geliştirilen algoritmalar donanıma minimum gereksinimler getirmelidir. Birleşik koruma rölesi ve güç kalitesi analizörünün yapısı Şekil 4'te gösterilmiştir.



**Şekil 4:** Koruma fonksiyonlarını güç kalitesi analizi ile güç şebekesi bağlantı noktaları ve koruma rölesi analizörü

Güç kalitesi analizörü ve koruma rölesinin mimarileri yapı ve çalışma sistemi olarak çok benzerdir. Sadece Şekil 4'te farklı bir renkle işaretlenmiş geçici gerilim dalgalanma ölçüm modülünde farklılık gösterilmektedir. Her iki cihazda uygulanan temel sinyal parametrelime yazılımı spektrum tespiti için Fourier tekniklerini kullanırken, koruma röleleri ek olarak koruma algoritmaları yazılımı ve güç kalitesi analizörleri daha ayrıntılı spektrum analizi ve istatistiksel yazılım içermektedir. Güç kalitesi analizörleri, 2 kHz'e kadar sinyalin harmonik ve içeriğini doğru bir şekilde ölçmek için daha geniş giriş bant genişliğine sahiptir. Koruma rölesi ve güç kalitesi analizörünü tek bir cihazda uygun maliyetli bir şekilde birleştirmek için, dijital alanda aşırı örnekleme ve etkili örnekleme oranını değiştirme gibi gelişmiş sinyal işleme tekniklerinin kullanılması gerekir. Modern mikroişlemci kontrollü koruma röleleri, koruma algoritmaları

tarafından kullanılan RMS gibi sinyal parametrelerini elde etmek için analog akım ve gerilim sinyallerinin örnekleme ve örnek seri dijital sinyal işleme kullanılır. Bu bakımdan, örnek dizilerinden sinyal parametrelerinin hesaplamasını da yapan bağımsız güç kalitesi analizörlerine benzerler. Dijital dönüştürücülere hızlı ve yüksek çözünürlüklü analog kullanılabilirliği, koruma rölesi ve güç kalitesi analizörü için eşit derecede uygun olan uygun maliyetli sinyal ön uç tasarımı sağlamaktadır.

#### 4. YEK'LERE DAYALI GÜÇ KALİTESİ ANALİZİ VE İZLENME (ENERGY QUALITY BASED POWER QUALITY ANALYSIS AND MONITORING)

Geçtiğimiz on yıl içinde, dağıtım seviyesindeki yenilenebilir enerji teknolojilerinde önemli bir ölçüde büyüme kaydedildi; güç sektöründe özellikle güneş ve rüzgar enerjisindeki büyük ölçekli maliyet düşüşleri sayesinde bu artışa öncülük ediyor. Ancak, sanayi ve binalar gibi son kullanım sektörlerinde yenilenebilir kaynakların alımı daha yavaş olmuştur. Yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik üretimi 2018 yılında bir önceki yıla göre 450 terawatt saat (TWh) (veya %7) artışla büyümeye devam etti ve toplam enerji üretiminin dörtte birinden fazlasını oluşturdu. Güneş PV, rüzgar ve hidro üretiminden elde edilen büyüme, artışın %90'ını oluşturmaktadır. IEA'nın 2019 yılı tahmini, yıllık yenilenebilir ilavelerin güçlü bir şekilde büyümeye devam edeceğini düşünse de 2018'de yaklaşık 180 gigawatt (GW) yeni yenilenebilir güç kapasitesi eklendi. Belirtilen Politikalar Senaryosunda, Tablo 1'de gösterildiği gibi 2040 yılında küresel olarak yaklaşık üçte ikisi yenilenebilir enerji olan yaklaşık 8.500 GW yeni güç kapasitesi eklenmektedir.

Yenilenebilir enerji kaynakları çoğu bölgedeki kapasite artışlarını oluşturmaktadır. Bu artış, Avrupa Birliği ve Çin'deki ilavelerin yaklaşık %80'ini içerir, ancak Güneydoğu Asya ve Orta Doğu'daki ilavelerin yarısından daha azını sağlarlar. Güneş PV, Çin ve Hindistan da dahil olmak üzere çoğu bölgede yenilenebilir kapasite ilavesinden en büyük payı almaktadır. Sürdürülebilir Kalkınma Senaryosunda, yenilenebilir enerji kaynakları tüm bölgelerde, esas olarak nükleer enerji ve karbon yakalama teknolojileriyle tamamlanan kapasite artışlarının yaklaşık %80'ini oluşturmaktadır [60].

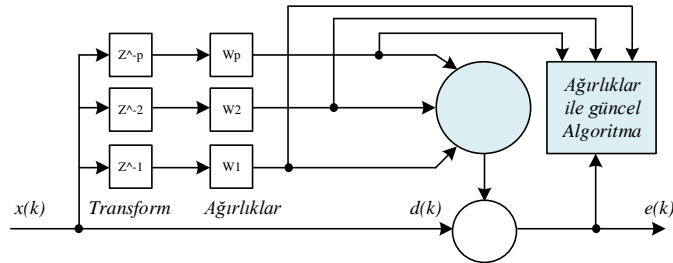
**Tablo 1.** Yenilenebilir enerji kaynaklarındaki gelişmeler

	Belirtilen Politikalar			Sürdürülebilir Kalkınma		Değişim	
	2018	2019-30	2031-40	2019-30	2031-40	Belirtilen Politikalar	Sürdürülebilir Kalkınma
Yenilenebilir enerji üretimi	304	329	378	528	636	24%	109%
Rüzgar	89	111	122	180	223	37%	151%
Güneş-FV	135	116	125	179	191	-7%	41%
Diğer yenilenebilir kaynaklar	25	117	139	124	145	456%	480%
Toplam	329	456	517	652	781	57%	137%
Kümülatif		5477	5166	7829	7802		

YEK'e dayalı güç üretimi, rüzgar ve güneş kaynaklarının kısmi öngörülemezlik özelliklerinin ve kontrol edilemeyen değişkenliğin bir kombinasyonu nedeniyle hem rüzgar hem de PV güç üretiminin performansında dalgalanmalara bağlı enerji kesintileri yaşanır [61,62]. Bu iki tür yenilenebilir enerji kaynağının çıktılarını, rüzgar hızı ve güneş enerjisindeki farklılıklar nedeniyle büyük değişkenlikler göstermektedir. Bu değişimler, doğrudan gerilim ve frekans dalgalanmalarına neden olmaktadır. Bu dalgalanmaları hafifletmek için, elektrik şebekesinin arz ve talebini anlık olarak dengelemek için ek enerji gerekmektedir. Bu ek, güç sistemlerinde beklenmedik olaylar karşısında, güç sistemine yedekte tutulan hazır enerji olarak tanımlanır [63]. Rüzgar ve güneş kaynaklarından hava ve üretim çıktısını çeşitli zaman aralıklarında daha doğru tahmin etmeyi amaçlayan gelişmiş hava ve üretim tahmin teknolojileri, rüzgar ve güneş kaynaklarının kısmi öngörülemezlik özelliklerini azaltmak için başka bir çözüm olabilir [64]. Güç kalitesi sorunu düşük penetrasyon için cihaz düzeyinde kalır ve bu durumda çözüm genellikle cihaza özgü olur [65]. Eşit bir güç kalitesini sağlamak için uygun ve kontrollü bir izleme gereklidir. Monitör ve analiz sistemleri güç kalitesi için yaygın olarak kullanılmaktadır. Daha önce yapılan çalışmalarda, güç kalitesi endeksinin dalgalı durumu izlenmiştir [66]. Bu, zaman alanı sinyallerinin alınmasına dayanan frekans spektrumu analiz yöntemi ile yapılmıştır. Güç kalitesindeki dalgalanmaların etki faktörü de analiz edilmiştir. Bir izleme ve analiz aracı olan LabVIEW de geliştirilmiştir. Daha önce de belirtildiği gibi, harmonikler elektrik şebekesinin güç kalitesini tehdit eder ve ekipmanın güvenliğine zarar vermektedir. Güç kalitesini artırmak için harmonik sinyallerin dengelenmesi gerekir.

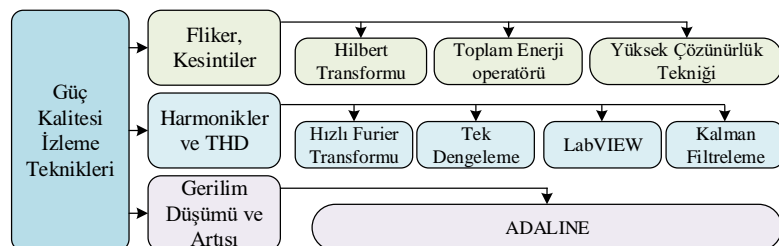
Tablo 2. Güç kalitesini analiz yöntemleri karşılaştırması

Yöntem	Özelliği	Referans
Hızlı Fourier Dönüşümü	Algoritmaları ayrıık fourier hesaplamasının temeline dayanır. Bu algoritma, ayrıık fourier dönüşümünden daha verimlidir. Diğer taraftan, Dalgacıklar verileri veya sinyali farklı frekans bileşenlerine ayıran ve her bir bileşeni kendi ölçeğine uygun bir çözünürlükle inceleyen matematiksel işlevlerdir ve ayrıık fourier dönüşümünden daha verimlidir	[67], [68]
Dalgacık Dönüşümü	Verileri veya sinyali farklı frekans bileşenlerine ayıran ve her bir bileşeni kendi ölçeğine uygun bir çözünürlükle inceleyen matematiksel işlevlerdir.	[69], [70]
Tekil Değer Ayırması	Bozulma aralıklarının bölümlere dayalı olarak bozulma aralıklarının felaket noktalarını tanımlamak için uygulanır	[71], [72]
Yapay Sinir Ağı	Geleneksel aktif güç filtrelerine kıyasla uygulama kolaylığı ve hızlı dinamik tepki sağlar. Akıllı kontrolde sinir ağı uygulamalarının derinlemesine analizi ve güç kalitesi telafisi için olanak sunulur. Hem referans telafi akımları hem de filtre için akım kontrolörü yapay sinir ağı tekniği kullanılır.	[73]
Uyarlanabilir Doğrusal Birleştircidir	Gerilim düşmesi, yükselmesi, geçici akımları, kesilmeleri algılamak için de etkilidir. Bu yöntem, güç kalitesi tespiti için bir eşik değeri ayarlama ihtiyacını ortadan kaldırır. Daha doğrusu yüksek bir izleme yeteneği sağlar. ADALINE girişı, gecikmeli sinyallerdir ve Şekil 5'te gösterilen çıkış, sinyalin tahmin edilen değerini ifade etmektedir	[74], [75]
Hilbert Transform	Sinyalin zarfını izlemek için kullanılan bir algoritmadır. HT yöntemi, anlık spektrumun her bir frekans bileşenini 90 derece kaydırır. Bu yöntem, bir analog sinyalin tüm geçiş filtresi kullanılarak belirli bir frekans bandında kullanılabilir hem toplam enerji operatörü hem de HT gerilim titremesi problemini izlemek için kullanışlıdır	[76], [77]



Şekil 5: ADALINE tabanlı algılama şeması

Doğrusal olmayan bir operatör olan toplam enerji operatörü algoritması, sinyalin anlık enerji içeriğini izlemek için kullanılır. Sinyali üreten mekanik işlemin ölçümü toplam enerji operatörü tarafından faydalı bir şekilde yapılabilir. Bu operatörün değeri, sinyal genliği ve frekansının çarpımının karesidir. Bozuk sinyal iki ayrı sinyale ayrılır: düzgünleştirilmiş sürüm ve ayrıntılı bir sürüm. Yüksek frekans, toplam enerji operatörü kullanılarak düzeltilmiş versiyondan düşük frekans bozukluklarının tespit edilebildiği detaylı versiyonda tespit edilebilir. Şekil 6'da güç kalitesi izleme teknikleri özetlenmiştir.

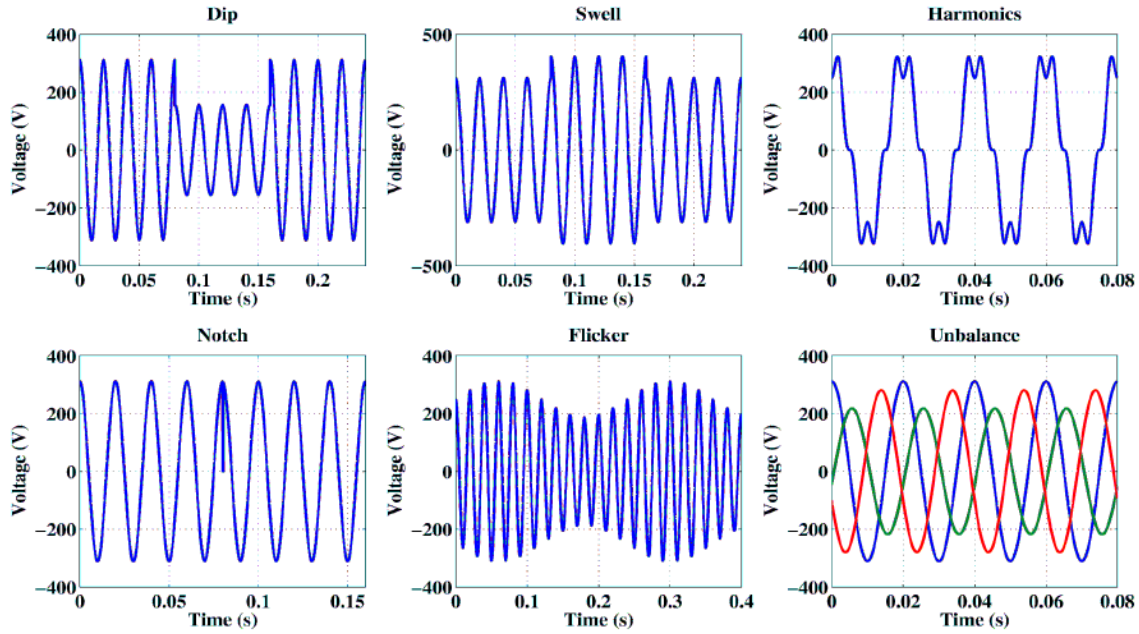


Şekil 6: Güç kalitesi izleme teknikleri

Gerilim ve akım dalga biçimleri ideal görünümlerinden farklı olduğunda güç kalitesi sorunları ortaya çıkar. İdeal olarak, gerilim ve akımlar nominal değerlerine göre sabit bir genlik ve frekans ile sinüzoidal olmalıdır. Ayrıca, gerilim ve akım dalga biçimlerinin fazda olması ve üç fazlı sistemlerde dengelenmeleri gerekir. Düşük güç kalitesine yol açan temel bozukluklar aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir ve sıralanabilir:

- *Geçici akımlar (süre temel döngüden (20 ms) azdır); Darbeli geçişler ve salınımlı geçişler.*
- *Kısa süre değişimleri (süre 1 dakikadan azdır); Kesintiler (genlik, nominal değer %10'undan azdır), Düşüşler veya Sarkmalar (genlik %90 ile %10 arasında), Şişme (genlik %110- %180).*
- *Uzun süre değişimleri (süre 1 dakikadan fazladır); Kesintiler (karartma), Düşük gerilimler (genlik %90'dan azdır), Aşırı gerilimler (genlik %110'dan fazladır).*
- *Dengesizlikler (üç fazlı sistemlerde); Dalga biçimi bozulması, Harmonikler, İnterharmonikler, Çentikler DA bileşeni, Yüksek frekanslı gürültü.*
- *Gerilim dalgalanmaları (titreme) ve Frekans sapmaları.*

Bu bozulmalardan bazıları Şekil 7'de gösterilmektedir. Güç kalitesi günümüzde güvenlik, güvenilirlik, düşük kurulum maliyeti ve işletme gibi diğer konular kadar bir gereksinimdir. Ölçülemeyen bir şeyi geliştirmek mümkün olmadığından, güç kalitesi izleme sistemleri, metodolojileri ve düzenlemeleri gereklidir.



Şekil 7: Elektrik şebekelerinde yaşanan tipik bozukluklar

Güç kalitesi analizörlerinin tasarımındaki eğilim, yerel ölçümler için tek bir ve maliyetli bir cihazdan (bu tür ekipmanların sağladığı bilgileri anlayabilen ve yönetebilen, güç kalitesi konusunda güçlü bir arka plana sahip iyi eğitilmiş bir profesyonel bir kontrol tarafından işletilmektedir), Şebekeye yayılmış birden fazla cihaz ve güçlü iletişim özellikleri ile küresel dağıtılmış çözüm önerilmektedir. Ayrıca, tüm bilgileri işlemek için standartları baz alarak sorunların nedenlerine ve konumlarına, olumsuz eğilimlere uyum hakkında teşhis ve raporlar sağlamak için akıllı algoritmalara sahip güçlü yazılım araçları mevcuttur. Bu sistemlerde iletişimin önemi nedeniyle, güç kalitesi izleme uygulamaları için IEC 61850 gibi elektrik sistemi iletişimi için bir standartlar benimsenmiştir.

#### 4.1. YEK'lerde Dinamik Yöntemler (Dynamic Methods in RES)

Geleneksel güç sistemlerinde güç, statik ve dinamik yöntemler kullanılarak ekonomik olarak dağıtılabilir. Statik optimal dağıtım sadece belirli bir zamanda güç sistemi için optimal bir hedefe ulaşmaya çalışır, ancak farklı zaman anlarında sistem arasındaki içsel bağlantı dikkate alınmaz; dinamik optimum dağıtımında ise, bir jeneratörün tırmanma hızı üzerindeki sınır gibi farklı zaman anlarında sistemin kupa etkisini dikkate alır. Bu nedenle, hesaplama sonuçları gerçek gereksinimlerle daha uyumluyken, hesaplama işlemi dinamik dağıtımda daha karmaşıktır. Ayrıca, rüzgar enerjisi içeren güç sistemlerinin ekonomik dağıtımını, rüzgar



hızındaki rasgele değişiklikler nedeniyle dinamik modelleri benimsemektedir. Buna ek olarak, dinamik ekonomik dağıtım, rüzgar enerjisi çiftliğinin çıktı verilerinin her an optimum sürede bilgisi gerektirir. Bu nedenle, bir rüzgar enerjisi için çıktı öngörme hatasını en aza indirmek ve böylece ekonomik sevkیات zorluğunu azaltmak için yapay akıllı yöntemler geliştirilmiştir. Problemi çözmek için Kuantum Genetik Algoritma ve Güç Pareto Evrimsel Algoritması gibi teknikler benimsenmiştir.

YEK'ler yüksek değişkenliğe ve kesintilere sahiptir ve tak ve çalıştır şeklinde çalıştırılması gerekir. Buna göre, kontrolörlerinin hem tasarımda hem de uygulamada yerel, merkezi olmayan ve modüler olması gerekir. Başka bir deyişle, ne bir YEK kontrolörünün tasarımı diğerine bağlı olmamalı ne de gelecekte üçüncü bir YEK eklendiğinde bu iki kontrolörden birinin güncellenmesi gerekmemelidir. Gelecekteki şebeke için genel kontrol mimarisinin, bu merkezi olmayan tak ve çalıştır YEK kontrolörleri ile dağıtılmış geniş alan kontrolörlerinin bir kombinasyonu olması gerekir. Güç sisteminin dört temel bileşeninin dinamik modelleri- yani üretim, iletim, yük ve enerji depolama- geliştirilmektedir. Üretim birimleri geleneksel enerji santralleri ile beraber rüzgar/güneş gibi YEK'ler olarak sınıflandırılır. Enerji üretim ister rüzgar/güneş enerjisine dayalı olsun, ister geleneksel üretim tesisi veya enerji depolama tesislerinin içinde birçok üretim birimi ve depolama cihazı bulunmaktadır.

Aşağıda gösterildiği gibi, bir güç sisteminin  $k$ -th bileşeninin dinamik modeli için, bu bileşenin bir jeneratör, yük, depolama, rüzgar çiftliği veya güneş çiftliği için genel bir formu şu şekilde yazılabilir:

$$\sum_k \begin{cases} \mathbf{i}_k = \mathbf{f}_k(\mathbf{I}_k, \mathbf{V}_k, \mathbf{u}_k; \mathbf{a}_k), \\ \mathbf{P}_k + \mathbf{jQ}_k = \mathbf{g}_k(\mathbf{I}_k, \mathbf{V}_k; \mathbf{a}_k), \end{cases} \quad 1$$

$K$  parametresi 1'den  $N$ 'e kadar olan sayıları tanımlamaktadır. Her bileşen için iki ve fonksiyonunun ayrıntıları kısaca açıklanacaktır.  $N$  bileşenleri bir iletim ağı ile birbirine bağlanır.  $Y$  değeri şebeke giriş matrisini göstermektedir. İletim hatlarındaki güç dengesi Kirchhoff yasalarına göre hesaplanır.  $U_k$ 'nin kararlı durum değerinin, genellik kaybı olmadan sıfır olduğu varsayılır.

YEK üretimin yaygınlaşmasıyla, güç sistemi araştırmalarında kontrol ve optimizasyon için birçok ilginç fırsat ortaya çıkmaktadır. Bir yandan, şebekeyi elektrik kesintilerine karşı daha dayanıklı hale getirmek için geniş alan kontrolü zorunlu hale gelirken, diğer yandan yerel tak ve çalıştır tipi kontrolörler yenilenebilir enerji kaynakları için gerekli hale geliyor. Bu makalede, güç sistemlerinde kaliteye yönelik çözümler ve röle sistemleri hakkında kapsayıcı bir analiz yapılmıştır. Buradaki vizyon, bu analizi kontrol kuramcılarının ve güç mühendislerinin birlikte çalışması ve dünyanın her köşesinde elektrik enerjisi temini için sürdürülebilir ve güvenli bir gelecek yaratması için bir kaynak görevi görmesidir. Gelecekteki çalışmalar için açık soruların bir içeriği sunulmaktadır.

#### 4. SONUÇ (CONCLUSION)

Güç kalitesi problemi, modern elektrik şebekelerinde ele alınması gereken önemli bir konu haline gelmiştir. Arızaları önlemek ve tespit etmek için güç kalitesini izlemek ve teşhis etmek için global çözümler gerektirmektedir. Böylece, güç kalitesi sorunlarına faydalı bilgiler ve yanıtlar sağlamak için büyük miktarlarda olan heterojen bilgiyi çok hızlı ve otomatik bir şekilde aktarılmalı ve işlenmelidir. Bu gereksinimler güncel sistem tabanlı çözümlerin uygunluğunu göstermektedir. Bu makalede, güneş ve rüzgar enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı dağıtılmış üretim sistemleri için güç kalitesi konuları ele alınmıştır. Güç kalitesi sorunları, kaynakları ve parametreleri hakkında ayrıntılı bir araştırma sunulmuştur. Daha sonra, yenilenebilir enerji sistemlerinde güç kalitesi sorunları, güç kalitesini izleme teknikleri, bu amaçla kullanılan cihazlar ve güç kalitesi sorunlarının azaltılması için uygulamalar açıklanmıştır. Güç kalitesi izleme tekniklerinin ağırlıklı olarak harmonikleri izlemek için kullanıldığı, ancak röle sistemleri ve ADALINE en etkili izleme tekniğinin olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, güç sistemlerinde, statik ve dinamik yöntemlerin ekonomik olarak dağıtılabildiği konusunda yaklaşımlar analiz edildi. Bunun yanında, güç kalitesi olaylarını ve parametrelerini izlemek için kullanılan son metodolojileri veya teknikleri, farklı güç kalitesi sorunları için iletişim ve kontrol tekniklerini kullanmak için tercih edilen farklı teknolojilerin kullanımına yönelik alt yapıların hazırlanması hedeflenmektedir.

**KAYNAKLAR (REFERENCES)**

- [1] E. Styvaktakis, M. H. Bollen, and I. Y. Gu, "Classification of power system events: Voltage dips," in *Harmonics and Quality of Power*, 2000. Proceedings. Ninth International Conference on, 2000, pp. 745-750.
- [2] N. Edomah, "Effects of voltage sags, swell and other disturbances on electrical equipment and their economic implications," in *IEEE Proc. of 20th International Conference on Electricity Distribution*, 2009.
- [3] R. Thallam and G. Heydt, "Power acceptability and voltage sag indices in the three-phase sense," in *Power Engineering Society Summer Meeting*, 2000. IEEE, 2000, pp. 905-910.
- [4] C.-I. Chen, Y.-C. Chen, and C.-N. Chen, "A high-resolution technique for flicker measurement in power quality monitoring," in *Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, 2013 8th IEEE Conference on, 2013, pp. 528-533.
- [5] Steven Warren Blume, *Electric power system basics: for the nonelectrical professional*. John Wiley & Sons, pp. 199,2007
- [6] Bollen, M., "Understanding Power Quality Problems – Voltage Sags and Interruptions", IEEE Press Series on Power Engineering – John Wiley and Sons, Piscataway, USA (2000).
- [7] Delgado, J., "Gestão da Qualidade Total Aplicada ao Sector do Fornecimento da Energia Eléctrica", Thesis submitted to fulfilment of the requirements for the degree of PhD. in Electrotechnical Engineering, Coimbra, September 2002.
- [8] Y. Yan, Y. Qian, H. Sharif and D. Tipper, "IEEE Communications Surveys & Tutorials", Volume: 15, Issue: 1, First Quarter 2013, 10.1109/SURV.2012.021312.00034
- [9] Miller TJE, *Reactive power control in electric system* Wiley, New York, 1982.
- [10] Wang ZA, Yang J, Liu JJ., *Harmonic suppression and reactive power compensation*. Machinery Industry Press, Beijing (in Chinese), 2006.
- [11] Green MA., "Third generation photovoltaics: comparative evaluation of advanced solar conversion options". In: *Proceedings of the 29th IEEE photovoltaic specialists conference*, New Orleans, 19–24 May 2002, pp 1330–1334, 2002.
- [12] Zhao ZM, Liu JZ, Sun XY (2005) *Solar photovoltaic power generation and its application*. Science Press, Beijing (in Chinese)
- [13] Ackerman T. ed., "Wind Power in Power Systems", ISBN 0-470-85508-8, John Wiley & Sons, England, 2005.
- [14] Gilbert M., "Renewable and efficient electric power systems", ISBN 0-471-28060-7, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2004.
- [15] Jordi Pegueroles-Queralt, et. al., "A Power Smoothing System Based on Supercapacitors for Renewable Distributed Generation", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Volume: 62 , Issue: 1 , Jan. 2015

- [16] Lie Zhang, et. al., “A review of supercapacitor modeling, estimation, and applications: A control/management perspective”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, volume 81, Part 2, January 2018, Pages 1868-1878
- [17] Ozcanli, AK, Yaprakdal, F, Baysal, M. Deep learning methods and applications for electrical power systems: A comprehensive review. *Int J Energy Res.* 2020; 1– 22. <https://doi.org/10.1002/er.5331>
- [18] El-Saadany EF, Salama MMA, Chikhani AY (2000) Passive filter design for harmonic reactive power compensation in single-phase circuits supplying
- [19] Ali Moradi Amani, Nozhatalzaman Gaeini, Mahdi Jalili, Xinghuo Yu, “Voltage Control in Distributed Generation Systems Based on Complex Network Approach” *Energy Procedia*, volume 110, March 2017, Pages 334-339
- [20] Francisc Zavoda, “Advanced distribution automation (ADA) applications and power quality in Smart Grids” *CICED 2010 Proceedings IEEE*, 22 March 2011, China
- [21] Yaprakdal, F.; Yilmaz, M.B.; Baysal, M.; Anvari-Moghaddam, A. A Deep Neural Network-Assisted Approach to Enhance Short-Term Optimal Operational Scheduling of a Microgrid. *Sustainability* 2020, 12, 1653.
- [22] Qiang Fu, “Microgrid Generation Capacity Design With Renewables and Energy Storage Addressing Power Quality and Surety” *IEEE Transactions on Smart Grid*, volume: 3 , Issue: 4 , Dec. 2012
- [23] Yaprakdal, F.; Baysal, M.; Anvari-Moghaddam, A. Optimal Operational Scheduling of Reconfigurable Microgrids in Presence of Renewable Energy Sources. *Energies* 2019, 12, 1858.
- [24] H.L. Jou, J.C. Wu, K.D. Wu, “Parallel operation of passive power filter and hybrid power filter for harmonic suppression” *IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution*, Volume 148, Issue 1, 2001
- [25] Akagi H., “Trend in active power line conditioners”. *IEEE Trans Power Electron* 9(3):263–268, 1994.
- [26] Khadkikar V, Chandra A., “A new control philosophy for a unified power quality conditioner (UPQC) to coordinate loadreactive power demand between shunt and series inverters”. *IEEE Trans Power Deliv* 23(4):2522–2534, 2008.
- [27] Zeng Xiang, et. al. “Design, control and comparative analysis of an LCLC coupling hybrid active power filter” *The Institution of Engineering and Technology*, vol 23,1, 2020.
- [28] Tur, M.R., Wadi, M., Shobole, A. and Ay S., “Load Frequency Control of Two Area Interconnected Power System Using Fuzzy Logic Control and PID Controller” *IEEE ICRERA* 14-17 Oct. 2018, France
- [29] Zhao W., “Harmonic suppression and reactive power compensation theory and application research in high voltage distribution networks”. Ph D Thesis, Hunan University, Changsha, 2010.
- [30] Faleh A. and Marcelo G. S., “Current Balancing Algorithm for Three-Phase Multilevel Current Source Inverters”, *Energies* 2020, 13(4), 860; <https://doi.org/10.3390/en13040860>
- [31] Zhongjie G., Wei W., Lajun C., Zhaojian W. and Shengwei M., “Operation of Distribution Network Considering Compressed Air Energy Storage Unit and its Reactive Power Support Capability” *IEEE Transactions on Smart Grid*, 1 - 1 (Early Access), 10.1109/TSG.2020.2966742, 2020





- [32] Ricardo M., Arias V., Jennifer V., Mejía L., “Harmonic failure in the filter of Static Var Compensator” *Engineering Failure Analysis* Volume 107, January 2020, 104207
- [33] Gyuyi L, Talor ER, “Characteristic of static, thyristorcontrolled shunt compensators for power transmission system applications”. *IEEE Trans Power Appar Syst* 99(5):1795–1804, 1980.
- [34] Sasidharan S., et. al., “Power system loading margin enhancement by optimal STATCOM integration – A case study”, *Computers & Electrical Engineering*, Volume 81, January 2020, 106521
- [35] Ghosh A, Ledwich G., “Load compensating DSTATCOM in weak AC systems”. *IEEE Trans Power Deliv* 18(4):1302–1309, 2003.
- [36] Tesfahun M., “Power Quality Improvement in Distribution System Using Dynamic Voltage Restorer”, *Handbook of Research on New Solutions and Technologies in Electrical Distribution Networks*, pp.16, 10.4018/978-1-7998-1230-2.ch003, 2020
- [37] Chan K, Kara A, Kieboom G, “Power quality improvement with solid state transfer switches”. In: *Proceedings of the 8th international conference on harmonics and quality of power*, vol 1, Athens, pp 210–215, 14–18 Oct 1998.
- [38] B. Singh, et.al., “A review of single-phase improved power quality AC-DC converters”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Volume: 50 , Issue: 5 , Oct. 2003
- [39] Bashi SM, Jasni J, Weng OY., “Voltage regulation of uninterrupted power supplies. In: *Proceedings of the IEEE student conference on research and development*” (SCORED’03), Putrajaya, pp 385–389, 25–26 Aug 2003
- [40] P. Sundaramoorthi, V. Prasannamoorthy, R. Kathiravan, “Design and Implementation of Battery Based Dynamic Voltage Restorer for Power Quality Issues in Domestic Grid” *TEST Engineering and Management*, ISSN: 0193-4120 Page No. 3148-3152, 2020
- [41] Liu JW, Choi SS, Chen S., “Design of step dynamic voltage regulator for power quality enhancement”. *IEEE Trans Power Deliv* 18(4):1403–1409, 2003.
- [42] Surya P.T. and Satish K.P. “A New Topology of Interline Unified Power-Quality Conditioner for Multi Feeder System”, *Advances in Decision Sciences, Image Processing, Security and Computer Vision* pp 507-519, 2019
- [43] Fujita H, Akagi H. “The unified power quality conditioner: the integration of series and shunt-active filters”. *IEEE Trans Power Electron* 13(2):315–322, 1998.
- [44] Lesnicar A, Marquardt R, “An innovative modular multilevel converter topology suitable for a wide power range”. In: *Proceedings of the 2003 IEEE Bologna power technology conference*, vol 3, 6 pp Bologna, 23–26 June 2003,
- [45] Kouro S, Malinowski M, Gopakumar K et al., “Recent advances and industrial applications of multilevel converters”. *IEEE Trans Ind Electron* 57(8):2553–2580, 2010
- [46] Yongchun Y., et. al., “Energy Storage Characteristic Analysis of Voltage Sags Compensation for UPQC Based on MMC for Medium Voltage Distribution System” *Energies* 2018, 11(4), 923; <https://doi.org/10.3390/en11040923>
- [47] Ghetti FT, Ferreira AA, Brage HAC, et al. (2012) A study of shunt active power filter based on modular multilevel converter (MMC). In: *Proceedings of the 10th IEEE/IAS international conference on industry applications (INDUSCON’12)*, Fortaleza, 5–7 Nov 2012, 6 pp

- [48] Lawan, A.U., “Power compensation for vector-based current control of a modular multilevel converter (MMC) based STATCOM”, *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*; Yogyakarta Vol. 10, Iss. 4, (Dec 2019): 1781-1796.
- [49] Nieves M, Maza JM, Mauricio JM, et al. (2014) Enhanced control strategy for MMC-based STATCOM for unbalanced load compensation. In: *Proceedings of the 16th European conference on power electronics and applications (EPE'14-ECCE Europe)*, Lappeenranta, 26–28 Aug 2014, 10 pp
- [50] Wanfeng Z., Guang F., Yan F.L. and Bin W., “A digital power factor correction (PFC) control strategy optimized for DSP”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, volume: 19 , Issue: 6 , Nov. 2004.
- [51] Long YB, Xiao XN, Xu YH et al., “MMC-UPQC: application of modular multilevel converter on unified power quality conditioner”. In: *Proceedings of the 2013 IEEE Power and Energy Society general meeting (PES'13)*, Vancouver, 5 pp, 21–23 July 2013.
- [52] Tur, M.R. and Bayindir, R., “A Review of Active Power and Frequency Control in Smart Grid” 2019 1st Global Power, Energy and Communication Conference (IEEE GPECOM2019), June 12-15, 2019, Cappadocia, Turkey
- [53] Yao K, Ruan XB, Zou C et al (2012) Three-phase single-switch boost PFC converters with high input power factor. *Proc CSEE* 32(6):97–105 (in Chinese)
- [54] Sheng L., Zheng X., Wen H., Geng T., Yinglin X., “Electromechanical Transient Modeling of Modular Multilevel Converter Based Multi-Terminal HVDC Systems”, *IEEE Transactions on Power Systems*, volume: 29 , Issue: 1 , Jan. 2014.
- [55] Zeng Z, Zhao RX, Yang H et al (2012) A multi-functional gridconnected inverter and its application to customized power quality of microgrid. *Power Syst Technol* 36(5):58–67
- [56] Lei Z., et. al., “Modeling, control, and protection of modular multilevel converter-based multi-terminal HVDC systems: A review”, *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, volume: 3 , Issue: 4 , Dec. 2017.
- [57] Leung CK, Dutta S, Baek S et al (2010) Design considerations of high voltage and high frequency three phase transformer for solid state transformer application. In: *Proceedings of the 2010 IEEE energy conversion congress and exposition (ECCE'10)*, Atlanta, 12–16 Sept 2010, pp 1551–1558
- [58] Xiaoqian L., Qiang S., Wenhua L., Hong R., Shukai X. And Licheng L., “Protection of Nonpermanent Faults on DC Overhead Lines in MMC-Based HVDC Systems” *IEEE Transactions on Power Delivery*, volume: 28, Issue: 1 , Jan. 2013.
- [59] *World Energy Outlook 2019*, International Energy Agency 9 rue de la Fédération 75739 Paris Cedex 15 France
- [60] F. Blaabjerg, R. Teodorescu, M. Liserre, and A. V. Timbus, "Overview of control and grid synchronization for distributed power generation systems," *IEEE Transactions on industrial electronics*, vol. 53, pp. 1398-1409, 2006.
- [61] F. Blaabjerg, Z. Chen, and S. B. Kjaer, "Power electronics as efficient interface in dispersed power generation systems," *IEEE transactions on power electronics*, vol. 19, pp. 1184-1194, 2004
- [62] M.R. Tur, S. Ay, A. Shobole, M. Wadi, “Güç Sistemlerinde ünite tahsisi için döner rezerv gereksinimi optimal değerinin kayıp parametrelerin dikkate alınarak hesaplanması”, *Journal of the*

Faculty of Engineering & Architecture of Gazi University . 2018, Vol. 2018 Issue 18, Part 2, p1-20. 20p.

- [63] I. E. C. (IEC). (August 13). Grid Integration of Large-Capacity Renewable Energy Sources and Use of Large-Capacity Electrical Energy Storage [White Paper]. Available: <http://www.iec.ch/whitepaper/pdf/iecWP-gridintegrationlargecapacity-LR-en.pdf>
- [64] Eklas H., Mehmet Rıda T., Sanjeevikumar P., Selim A., Imtiaj K., “Analysis and Mitigation of Power Quality Issues in Distributed Generation Systems Using Custom Power Devices”, IEEE Access, Volume: 6, 2018
- [65] K. Suslov, N. Solonina, and A. Smirnov, "Distributed power quality monitoring," in Harmonics and Quality of Power (ICHQP), 2014 IEEE 16th International Conference on, 2014, pp. 517-520.
- [66] F.-s. Zhang, Z. Geng, and Y. Ge, "FFT algorithm with high accuracy for harmonic analysis in power system," PROCEEDINGS-CHINESE SOCIETY OF ELECTRICAL ENGINEERING, vol. 19, pp. 63-66, 1999
- [67] T. Lobos, T. Kozina, and H.-J. Koglin, "Power system harmonics estimation using linear least squares method and SVD," IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, vol. 148, pp. 567-572, 2001.
- [68] William D. Stanley, Technical Analysis & Applications with MATLAB, Thomson Delmar Learning, Canada, pp. 429-446, 2005.
- [69] J.B. Reddy & D.K. Mohanta, B.M. Karan, Power System Disturbance Recognition Using Wavelet and S-Transform Techniques, International Journal of EEPS (1)1007, 2004.
- [70] Randall Shaffer, Fundamentals of Power Electronics with MATLAB, Thomson Delmar Learning, Boston-Massachusetts, pp. 33-36, 2007.
- [71] Liu, Z.; Cui, Y.; Li, W. A classification method for complex power quality disturbances using EEMD and rank wavelet SVM. IEEE Trans. Smart Grid 2015, 6, 1678–1685
- [72] Arrillaga J. & Watson N.R, Power System Quality Assessment, John Wiley & Sons Inc, New York, 1985.
- [73] L.-l. ZHANG and G.-z. WANG, "New Artificial Neural Network Approach for Measuring Harmonics [J]," Proceedings of Electric Power System and Automation, vol. 2, p. 009, 2004.
- [74] D. Castaldo, D. Gallo, C. Landi, R. Langella, and A. Testa, "Power quality analysis: a distributed measurement system," in Power Tech Conference Proceedings, 2003 IEEE Bologna, 2003, p. 6 pp. Vol. 3.
- [75] W. Huang and Y. Dai, "Energy Operator and Wavelet Transform Approach to Online Detection of Power Quality Disturbances," in Signal Processing, 2006 8th International Conference on.
- [76] M.R. Tür, “Solution Methods and Recommendations for Power Quality Analysis in Power Systems”, Journal of Engineering and Technology 2;2 (2018) 1-9
- [77] W. Tong, S. Yuan, Z. Li, and X. Song, "Detection of voltage flicker based on hilbert transform and wavelet denoising," in Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, 2008. DRPT 2008. Third International Conference on, 2008, pp. 2286-2289.

## Theoretical Optimization Of The P-N Type Semiconductor Material Pair In Thermoelectric Generator That Achievement Exhaust Waste Heat Recovery

 Ümit TOPALCI<sup>1,\*</sup>  Habib GÜRBÜZ<sup>1</sup>  Hüsameddin AKÇAY<sup>1</sup>  Selim DEMİRTÜRK<sup>2</sup> 
<sup>1</sup>Suleyman Demirel University Faculty of Engineering Department of Automotive Engineering, 32200, Merkez/ISPARTA

<sup>2</sup>Uşak University Vocational School of Technical Sciences Automotive Technology Program, 64000, Merkez, Uşak

### Graphical/Tabular Abstract

#### Article Info:

Research article

Received: 23/04/2020

Revision: 20/06/2020

Accepted: 03/07/2020

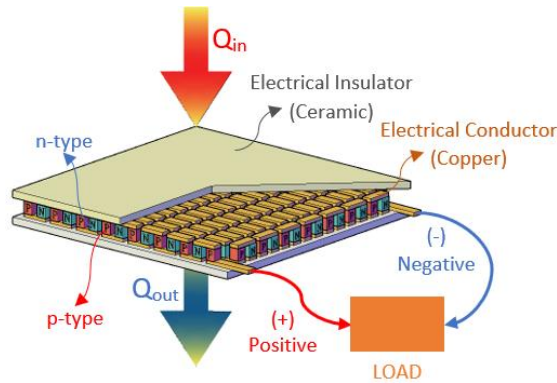
#### Highlights

- Waste Heat Energy
- Thermoelectric Generator
- Matlab-Simulink

#### Keywords

 Internal Combustion  
 Engine  
 Exhaust waste heat  
 recovery  
 Semiconductor material  
 Thermoelectric Module  
 and Thermoelectric  
 Generator

In the study, 4 different p-n pairs were formed for p-n pairs which forming thermoelectric modules, consisting of a combination of 4 different semiconductor materials of type  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ,  $\text{Bi}_{0.3}\text{Sb}_{1.7}\text{Te}_3$ ,  $\text{PbSe}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$  and  $\text{Zn}_4\text{Sb}_3$  used for Thermoelectric Generator that simulated on Matlab/Simulink.



**Figure A.** Structure of a Thermoelectric Module with Load

**Purpose:** In this study, a thermoelectric module design using 4 different p-n type semiconductor material properties is simulated. The electrical output parameters of the thermoelectric generator were investigated with the data sets taken under certain engine conditions.

**Theory and Methods:** Flow diagram of the whole system is presented for the modeled system. The structural properties of the p-n type semiconductor pairs used and the calculations of the thermoelectric generator are given step by step.

**Results:** The results showed that the TEM structure formed by using p:  $\text{Bi}_{0.3}\text{Sb}_{1.7}\text{Te}_3$  and n:  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  type semiconductors among the p-n semiconductor pairs analyzed under the specified motor operating conditions was determined to be the most appropriate p-n pair combination in terms of the output performance of the TEJ.

**Conclusion:** As a result, the higher electrical output of TEMs created with pn pairs formed from combinations of  $\text{Bi}_{0.3}\text{Sb}_{1.7}\text{Te}_3$ ,  $\text{PbSe}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$  and  $\text{Zn}_4\text{Sb}_3$  semiconductor pairs, which are commercially available and used as an alternative to TEMs consisting of only  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  based pn pairs offers performance. However, Pb-based semiconductor materials used in TEMs show a performance close to Bi-based semiconductor materials available as commercial products in the market. However, Pb-based semiconductor materials performed lower than Sb-based semiconductor materials. In particular, higher electrical output was achieved with combinations of Bi and Sb based semiconductor material alloys instead of  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  based materials.



## Egzoz Atık Isı Geri Kazanımının Gerçekleştirildiği Termoelektrik Jeneratörde P-N Tipi Yarı İletken Malzeme Çiftinin Teorik Optimizasyonu

Ümit TOPALCI<sup>1,\*</sup> Habib GÜRBÜZ<sup>1</sup> Hüsameddin AKÇAY<sup>1</sup> Selim DEMİRTÜRK<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Otomotiv Mühendisliği Bölümü, 32200, Merkez/İSPARTA

<sup>2</sup> Uşak Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Otomotiv Teknolojisi Programı, 64000, Merkez, Uşak

### Öz

Bu çalışmada, içten yanmalı motorların egzoz atık ısı enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürülmesi için tasarlanmış termoelektrik jeneratörde farklı p-n tipi yarı iletken malzeme kullanımının termoelektrik jeneratörün çıkış parametreleri (yük akımı, yük altındaki çıkış gerilim ve gücü) üzerine etkisi teorik olarak araştırılmıştır. Çalışmada, termoelektrik modülleri oluşturulan p-n çiftleri için Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>, Bi<sub>0,3</sub>Sb<sub>1,7</sub>Te<sub>3</sub>, PbSe<sub>0,5</sub>Te<sub>0,5</sub> ve Zn<sub>4</sub>Sb<sub>3</sub> tipi 4 farklı yarı iletken malzemenin kombinasyonundan oluşan 5 farklı p-n çifti oluşturulmuştur. Belirlenen p-n çiftlerinden oluşturulan termoelektrik modüllerinin kullanıldığı termoelektrik jeneratör, daha önceki çalışmada Matlab/Simulink programında geliştirilen teorik termoelektrik jeneratör modeli kullanılarak analiz edilmiştir. Teorik modelde, iki silindirli buji ateşlemeli bir motorunun 1500-4000 d/d aralığında gerçekleştirilen deneysel çalışmalardan elde edilen egzoz gazının sıcaklık ve debisinin yanında motor soğutma suyu sıcaklık ve debi değerleri kullanılmıştır. Elde edilen bulgular, p-n çiftlerinde sırasıyla Bi<sub>0,3</sub>Sb<sub>1,7</sub>Te<sub>3</sub> ve Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> tipi yarı iletkenler kullanılarak oluşturulan termoelektrik modüller ile termoelektrik jeneratörün elektriksel yük altındaki çıkış gücünün en yüksek seviyede olduğunu göstermiştir. Ayrıca, 20 adet termoelektrik modül seri bağlanarak oluşturulan termoelektrik jeneratör ile 4000 d/d motor devrinde  $\Delta T = 162,4$  K sıcaklık farkı ile 86,53 W (çıkış akımı = 1,073 A ve çıkış voltajı = 80,64 V) DC elektrik gücü elde edilmiştir.

### Makale Bilgisi

Araştırma makalesi  
Başvuru: 23/04/2020  
Düzeltilme: 20/06/2020  
Kabul: 03/07/2020

### Anahtar Kelimeler

İçten Yanmalı Motor  
Egzoz atık ısı geri kazanımı  
Yarı iletken malzeme  
Termoelektrik Modül ve  
Termoelektrik Jeneratör

### Keywords

Internal Combustion  
Engine  
Exhaust waste heat  
recovery  
Semiconductor material  
Thermoelectric Module  
and Thermoelectric  
Generator

## Theoretical Optimization Of The P-N Type Semiconductor Material Pair In Thermoelectric Generator That Achievement Exhaust Waste Heat

### Abstract

In this study, the effect of the use of different p-n type semiconductor materials in the thermoelectric generator designed to convert the exhaust waste heat energy of the internal combustion engines to electrical energy on the output parameters of the thermoelectric generator (load current, output voltage and power under load) is theoretically investigated. In the study, 4 different p-n pairs were formed for p-n pairs, forming thermoelectric modules, consisting of a combination of 4 different semiconductor materials of type Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>, Bi<sub>0,3</sub>Sb<sub>1,7</sub>Te<sub>3</sub>, PbSe<sub>0,5</sub>Te<sub>0,5</sub> and Zn<sub>4</sub>Sb<sub>3</sub>. The thermoelectric generator using thermoelectric modules created from the determined p-n pairs was analyzed using the theoretical thermoelectric generator model developed in the Matlab/Simulink program in the previous study. In the theoretical model, the engine coolant temperature and flow values were used besides the temperature and flow rate of the exhaust gas obtained from experimental studies carried out in the 1500-4000 rpm range of a two-cylinder spark-ignition engine. The findings show that the thermoelectric generator produced the highest power output of the under the electrical load with the thermoelectric modules which is created using the Bi<sub>0,3</sub>Sb<sub>1,7</sub>Te<sub>3</sub> and Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> type semiconductors for the p-n pairs, respectively. Also, using the thermoelectric generator created by connecting twenty thermoelectric modules in series, 86.53 W (output current = 1.073 A and output voltage = 80.64 V) DC electrical power was obtained by the temperature difference of  $\Delta T = 162.4$  K at 4000 rpm engine speed.



## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Konvansiyonel bir içten yanmalı motora (İYM) alınan yakıtın ısı enerjisinin  $\approx\%25-35$ 'i çıkış milinde mekanik enerjiye dönüştürülürken  $\approx\%30$ 'u soğutma,  $\approx\%40$ 'ı egzoz kayıplarına ve geri kalan kısmı ise radyasyon, sürtünme ve yardımcı sistemlere harcanmaktadır [1,2]. Son yıllarda İYM'den soğutma ve egzoz yoluyla kaybettiği  $\%70$ 'lik ısı enerjisinin geri kazanılması araştırmacıların ilgi odağı olmuştur. Günümüzde, mikro türbin, organik Rankine çevrimi, kojenerasyon sistemleri, reküperatörler, yoğunlaşma ekonomizerler ve rejeneratif sistemler gibi birçok atık ısı dönüşüm sistemi ile atık ısı enerjisini faydalı enerjiye dönüştürülebilmektedir [3,4,5,6]. Bunların dışında, geçtiğimiz on yılda kullanımı yaygınlaşan termoelektrik jeneratörler (TEJ) ile atık ısı enerjisinin elektrik enerjine dönüştürülmesi mümkün olabilmektedir. TEJ'ler yarı iletken malzemelerden oluşturulan birden fazla termoelektrik modülün (TEM) seri ve/veya paralel olarak bağlanması ile istenilen akım ve voltaj değeri ile birlikte çıkış gücünün elde edildiği hemen hemen hiç bakım gerektirmeyen ve hareketli parçalara sahip olmayan DC elektrik üreteçleridir [7]. TEM'lerin kullanıldığı TEJ sistemleri aracın yakıt ekonomisi üzerinde önemli bir katkıya sahiptir. Ayrıca, uygun TEJ tasarımı ve optimizasyonu çıkış gücünün artırılması açısından oldukça önemli kriterlerdir [8]. TEJ'lerin içten yanmalı motorlu araçlarda kullanılmasına yönelik literatürde birçok teorik ve deneysel çalışma bulunmaktadır.

Sifi ve ark. BiCuSeO tabanlı malzemelerin sonlu elemanlar analizini kapsayan matematiksel modelini inceleyerek TEJ üzerindeki sıcaklık değişimlerini analiz etmişlerdir [9]. Britoa ve ark. taşıtlarda kullanılan TEJ sistemlerinin bir dezavantajı olan sürüş koşullarına bağlı TEM'ler üzerine düşen termal yük değişiminin etkisini inceledikleri çalışmada; TEM'ler arasına değişken iletkenliğe sahip termosifon tabanlı faz dönüşüm tamponu kullanmışlardır. Geliştirdikleri TEJ tasarımı ile TEM'ler üzerine düşen sıcaklık dağılımını homojene yakın düzeye getirmişlerdir. Çalışmada ayrıca, termosifon sistemi içindeki buharlaşma ve yoğunlaşma oranları ile ön şarj basıncının elektrik üretimi üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Bu TEJ yapısı ile yakıt tüketimi ve CO<sub>2</sub> emisyonunda  $\%6$ 'ya yakın iyileşme sağlamışlardır [10]. Pacheco ve ark. aşırı ısının yayıcı olarak görev yaptığı iletken alüminyum oluklu borular ile sıcaklık kontrolünün sağlandığı TEJ tasarımı gerçekleştirmişlerdir. Geliştirdikleri TEJ yapısı ile egzoz yolu üzerinde By-Pass hattı kullanılarak egzoz atık ısı enerjisinin bir kısmını harcamak yerine TEJ'in sıcak ve soğuk taraf eşanjörleri içerisinde mevcut ısıyı yayarak herhangi bir TEM üzerine düşen aşırı termal yükü azaltmışlardır. TEJ tasarımı ile maksimum 1538 W ve ortalama 572 W elektrik gücü üretiminin yanında yakıt tüketimi ve CO<sub>2</sub> emisyonunda  $\%5,4$ 'e yakın iyileşme sağlamışlardır [11]. Massaguer vd. içten yanmalı motorların soğukta ilk hareket, düşük yük ve düşük ortam sıcaklığında çalışması durumunda düşük katalitik konvertör veriminden dolayı yaklaşık  $\%20$  oranında artan NO<sub>x</sub>, HC ve CO emisyonlarının azaltılması için geliştirdikleri atık ısı geri kazanım sistemi ile motor ve katalitik konvektörün hızlı bir şekilde ısınmasını sağlamışlardır. Geliştirdikleri sistem ile katalizör verimliliğini  $\%94$ 'e çıkartarak NO<sub>x</sub> emisyonunda  $\%94$ , HC emisyonunda  $\%91$  ve CO emisyonunda  $\%97$  azalma sağlanabileceğini tespit etmişlerdir [12]. Wang vd. 3 boyutlu sayısal modelleme yöntemi ile iki farklı eşanjör tasarımı ve farklı TEJ konumlandırmasının kombinasyonu şeklinde gerçekleştirdikleri çalışmalarında; 3 farklı motor devrinde girdap çubuklu ve girdap çubuksuz eşanjör yapılarının TEJ performansına etkisini analiz etmişlerdir. Çalışma sonucunda, girdap çubuklu eşanjör yapısı ile daha homojen ısı dağılımı ve daha yüksek eşanjör yüzey sıcaklığı elde etmişlerdir [13]. Subramaniam ve ark. tipik bir otomobilde kullanılan TEJ yapısında 5 W kapasiteli 40 adet TEM kullanarak 255 kg/h egzoz gazı kütle akışı ve maksimum 358 °C sıcak taraf sıcaklığı ile 157 V açık devre gerilimi ile 27 W çıkış gücü elde ve  $\%0,4$  toplam sistem verimi elde etmişlerdir [14]. Kunt ve Gunes, tipik bir dizel motorun egzoz hattına yerleştirilen iki farklı TEJ sistemini, farklı motor hızlarında test ederek yüksüz elektriksel çıkış gücünü araştırmışlardır. Çalışmalarında, 0,0016 m<sup>2</sup> yüzey alanına sahip TEM ile 3500 d/d motor devrinde 0,92 W TEJ çıkış gücü elde etmişlerdir. Ayrıca, motor devrinin artışı ile TEM'lerin iç dirençlerinin arttığını ve maksimum 3500 d/d'de iç direncin 11,69 Ω olduğunu tespit etmişlerdir [15]. Quan vd. ADVISOR programını kullanarak TEJ, katalitik konvertör gibi tüm egzoz hattı bileşenlerini modelledikleri çalışmalarında, TEJ çıkışına bağlanan MPPT sisteminde, gözle algoritması, kuadratik interpolasyon ve sabit gerilim takibi yöntemlerini kullanarak TEJ'in çıkış gücündeki değişimleri araştırmışlardır. Sistemin enerji yönetiminde, pillerin şarj durumu ve değişen yüke göre kontrolün sağlandığı bulanık mantık yöntemini kullanmışlardır. Sonuç olarak, şehir içi sürüş şartlarında, TEJ sistemi ile harici yüklerin karşılanması için gerekli elektriksel güç tüketiminin karşılanabildiği ve sistemin toplam veriminin  $\%1,3$  civarında olduğunu belirtmişlerdir [16]. Shiriaev ve ark. optimum sıcaklık dağılımının elde

edilmesi için çok bölmeli olarak tasarladıkları TEJ yapısında, DC/DC konvertör kullanılarak motor devri ve elektrik yükü gibi parametrelerden bağımsız olarak TEJ'in çıkış gücünü MPPT yöntemi kullanarak elde etmeye çalışmışlardır. Sonuç olarak, TEJ çıkışında MPPT kullanımının bazı dezavantajlara sahip olduğunu belirtmişlerdir [17]. Quan ve ark. TEJ yapısının kullanıldığı entegre marş/jeneratör sistemli hibrit güç aktarma sistemine sahip bir SUV araçta, TEJ'in verimini ve yakıt tüketimine etkisini incelemişlerdir. Taşıtın farklı sürüş şartları için tespit ettikleri test kriterini kullandıkları ADVISOR programında, TEJ sistemi ve marş/jeneratör sisteminin dinamik özellikleri ve yakıt tüketimini analiz etmişlerdir. Şehir içi ve şehir dışı sürüş test standartlarını simule ettikleri çalışmada; TEJ sisteminin kullanılması ile batarya şarjı %51-75 arasında tutulurken yakıt tüketiminde %25 azalma elde etmişlerdir. Sistemin gerçek yol testlerinde ise, 125 km/h hızda 610 W TEJ çıkış gücü elde etmişlerdir [18]. Thacher ve ark. TEJ sistemine sahip 1999 model GMC-Sierra marke/model kamyonet kullanarak şasi dinamometresine sahip bir rüzgâr tüneline gerçekleştirdikleri testlerde; tasarladıkları TEJ prototipini optimize ederek yalnız TEJ sistemi, izoleli egzoz hattına sahip TEJ sistemi, izoleli egzoz hattı ve motor soğutma sıvısı (MSS) eşanjörüne sahip olmak üzere 3 farklı TEJ sistemi oluşturmuşlardır. Sonuç olarak, TEJ sistemine sahip araçta egzoz izolasyonu ve MSS eşanjörünün TEJ çıkış gücüne önemli etkisinin olduğunu tespit etmişlerdir [19].

Konu ile ilgili mevcut çalışmaların genelinde,  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  tabanlı p-n tipi yarı iletken malzemelerin tekli veya sınırlı sayıda örneğini içeren kombinasyonlardan oluşan TEM'lerin TEJ sisteminin elektriksel çıkış performansı üzerine etkileri araştırılmıştır. Ancak,  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  dışındaki p-n tipi yarı iletken malzemelerin kullanıldığı p-n çifti kombinasyonları ile oluşturulan ve TEM'i oluşturan her bir katmanın boyut ve malzeme özelliklerinin dikkate alındığı TEJ tasarımının elektriksel çıkış performansının incelendiği teorik ve/veya deneysel çalışmalar oldukça sınırlı sayıdadır. Bu çalışmada, literatürde mevcut bulunan çalışmalardan farklı olarak,  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ,  $\text{Bi}_{0,3}\text{Sb}_{1,7}\text{Te}_3$ ,  $\text{PbSe}_{0,5}\text{Te}_{0,5}$  ve  $\text{Zn}_4\text{Sb}_3$  tipi 4 farklı yarı iletken malzemenin kombinasyonundan oluşturulan 5 farklı p-n çiftinin TEM'in çıkış performansı üzerine etkisi teorik bir model ile incelenmiştir. Çalışmada kullanılan teorik modelde, TEM'i oluşturan her bir katmanın boyut ve malzeme özelliğinin dikkate alındığı detaylı bir analiz yapısı kullanılmaktadır. Teorik model ile gerçekleştirilen analizlerde, buji ateşlemeli bir motorunun 1500-4000 d/d aralığında gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda, TEJ'in sıcak-soğuk taraf akışkanlarının sıcaklık ve debi değerleri kullanılmıştır [20]. Deneysel çalışma sonuçlarına dayalı olarak Matlab/Simulink programında gerçekleştirilen teorik analizler sonucunda, kullanılan p-n tipi yarı iletkenler arasından en yüksek TEJ çıkış performansının elde edildiği p-n çifti tespit edilmiştir..

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

Çalışmada, literatürde kapalı formülü  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ,  $\text{Bi}_{0,3}\text{Sb}_{1,7}\text{Te}_3$ ,  $\text{PbSe}_{0,5}\text{Te}_{0,5}$  ve  $\text{Zn}_4\text{Sb}_3$  olarak verilen 5 farklı yarı iletken malzeme seçilmiştir. Yarı iletken malzemelerin teknik özellikleri Tablo 1'de ve 4 farklı yarı iletken malzemenin kombinasyonundan oluşturulan 5 farklı p-n çifti yapıları Tablo 2'de verilmiştir.

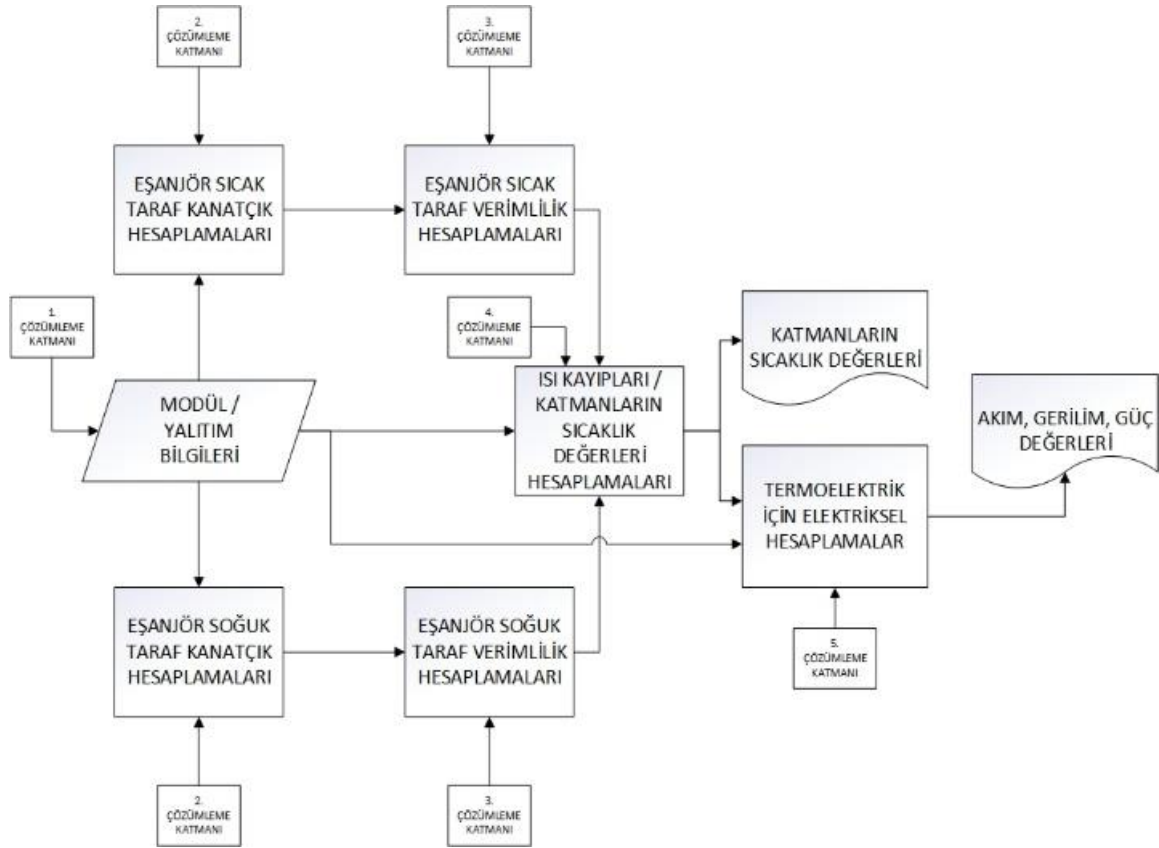
**Tablo 1.** Teorik modelde kullanılan yarı iletken malzeme özellikleri

p-n tipi yarı iletken		$\rho$ ( $\Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$ )	$\alpha$ ( $\mu\text{V/K}$ )	$\kappa$ (W/m-K)
$\text{Bi}_2\text{Te}_3$	[22]	$9,2593 \times 10^{-6}$	$-13,5 \times 10^{-5}$	0,92
$\text{Bi}_2\text{Te}_3$	[21]	$7,8 \times 10^{-6}$	$19 \times 10^{-5}$	2,59
$\text{Bi}_{0,3}\text{Sb}_{1,7}\text{Te}_3$	[22]	$17,543 \times 10^{-6}$	$20,6 \times 10^{-5}$	0,83
$\text{PbSe}_{0,5}\text{Te}_{0,5}$	[22]	$125 \times 10^{-6}$	$-29,5 \times 10^{-5}$	0,87
$\text{Zn}_4\text{Sb}_3$	[22]	$14,925 \times 10^{-6}$	$14,2 \times 10^{-5}$	0,92

**Tablo 2.** Teorik modelde kullanılan yarı iletken (p-n) malzeme çiftleri

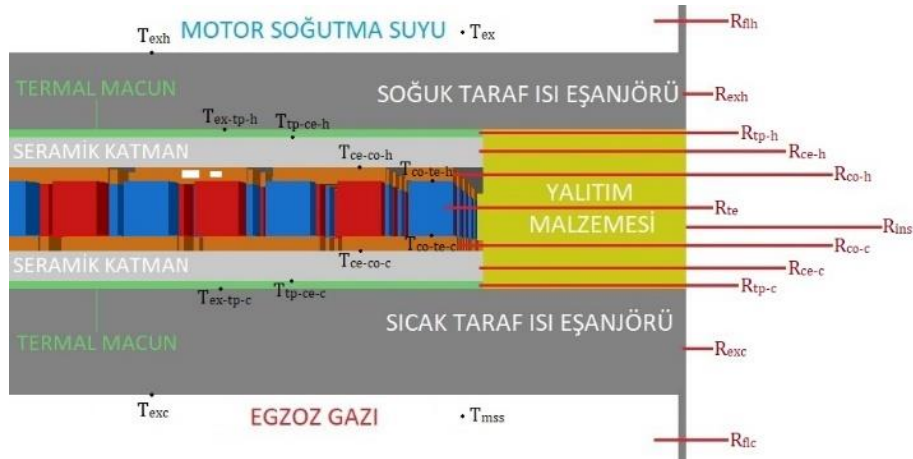
<b>MNo:1</b>		<b>MNo:2</b>		<b>MNo:3</b>		<b>MNo:4</b>		<b>MNo:5</b>	
p-tipi	n-tipi	p-tipi	n-tipi	p-tipi	n-tipi	p-tipi	n-tipi	p-tipi	n-tipi
$\text{Bi}_2\text{Te}$	$\text{Bi}_2\text{Te}$	$\text{Bi}_{0,3}\text{Sb}_{1,7}\text{T}$	$\text{PbSe}_{0,5}\text{Te}_0$	$\text{Bi}_{0,3}\text{Sb}_{1,7}\text{T}$	$\text{Bi}_2\text{Te}$	$\text{Zn}_4\text{Sb}$	$\text{Bi}_{0,3}\text{Sb}_{1,7}\text{T}$	$\text{Zn}_4\text{Sb}$	$\text{Bi}_2\text{Te}$

TEM'in Matlab/Simulink programında geliştirilen teorik modeli;1-Modül ve yalıtım hesaplamaları, 2-Kanatçık hesaplamaları, 3-Eşanjör verimlilik hesaplamaları, 4-Isı kayıpları ve katmanların sıcaklık değerlerinin hesaplanması ve 5-TEM'lerde elektriksel hesaplamalar olmak üzere 5 çözümlene katmandan oluşmaktadır. Bu çözümlene katmanlarından oluşan teorik TEM modelinin akış diyagramı Şekil 1'de görülmektedir.



Şekil 1. Matlab/Simulink programında geliştirilen TEM modelinin akış diyagramı

Belirlenen yarı iletken malzeme tiplerinin kombinasyonundan oluşturulan 5 farklı p-n çifti ile oluşturulacak TEM'ler sıcak ve soğuk taraf eşanjör yüzeylerinden yarı iletken malzeme yapısına ulaşana kadarki katmanlar üzerine düşen sıcaklık ve direnç değerlerinin hesaplanabileceği bir düzenleme içerisinde TEM yapısı oluşturulmuştur. TEM modelinde kullanılan katmanlara ait sıcaklık ve direnç tanımlamaları Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. TEJ modelinde kullanılan katmanların sıcaklık ve direnç tanımlamaları

Eşanjörde kullanılacak kanatçık hesaplamaları gerçekleştirilmiş ve eşanjör tasarımının termal verimliliği; MSS ve egzoz kütle akışı, Re sayısı, Nu sayısı, kanatçık geometrisi vb. parametrelere bağlı olarak analiz edilerek [21] katmanların sıcaklık noktaları değerleri Eşitlik 1-14 ile verilen ana formüller kullanılarak hesaplanmıştır. Teorik modelde, ısı kayıpları ve eşanjör katmanların sıcaklık değerlerinin hesaplanması, sıcak ve soğuk taraf yüzeyleri için ayrı ayrı hesaplanmıştır.

Egzoz gazı (h indekсли) ve MSS (c indekсли) akışkanlarının ısı direnci;

$$R_{flx} = \frac{1}{\eta_o * h * A_{tot,surf}} \quad 1$$

Diğer ısı dirençler ( $R_{aa}$ ), malzeme kalınlıkları ( $L_{aa}$ ), malzeme ısı iletkenlikleri ( $K_{aa}$ ) ve malzeme kesit alanları ( $A_{aa}$ ) değerleri ile her katman için kademe kademe Eşitlik 2-13'de verilen denklemler ile hesaplanmıştır.

$$R_{aa} = \frac{L_{aa}}{K_{aa} * A_{aa}} \quad 2$$

Bakır iletkenin ve modül için ısı direnç hesabı;

$$R_{bb} = \frac{L_{bb}}{K_{bb} * A_{bb} * n_{pn}} \quad 3$$

TEM'in toplam ısı direnci ( $R_{tej}$ );

$$R_{tej} = R_{flh} + R_{flc} + R_{alh} + R_{alc} + (R_{mod} // R_{ins}) \quad 4$$

Kanatçık yapısı ve malzeme tipine bağlı verimlilik sonucu oluşan sıcaklık farkı ( $\Delta T_\eta$ );

$$\Delta T_\eta = T_{ex} * \eta_o - T_{mss} * \eta_o \quad 5$$

EGS  $T_{ex}$ , MSS sıcaklığı  $T_{mss}$ , TEM sisteminin ısı transfer hızı ( $Q$ );

$$Q = \frac{\Delta T_\eta}{R_{tej}} \quad 6$$

Kanatçık yapısı ve malzeme tipine bağlı verimlilik sonucu oluşan akışkanların sıcaklık değeri ( $T_{flx}$ );

$$T_{flx} = T_{ex/mss} * \eta_o \quad 7$$

Artık her katman için  $T_{xx}$  sıcaklık değerleri bir önceki katman  $T_{yy}$  sıcaklık değerleri ve ısı direnç değerleri  $R_{xx}$  formülleri yardımı ile kademe kademe aşağıdaki formül ile hesaplanmıştır.

$$T_{xx} = T_{yy} - Q * R_{yy} \quad 8$$

Bakır katmanı sonrası p-n bacaklarına düşen sıcaklık farkı;

$$\Delta T_{te} = T_{cpex} - T_{cpmss} \quad 9$$

TEM'lerde elektriksel hesaplamalar, TEM'in Seebeck katsayısı ( $\alpha_{tem}$ ), TEM'in iç direnci ( $r_{tem}$ ), TEM'in açık devre gerilimi ( $V_{oc,tem}$ );

$$V_{oc,tem} = \alpha_{tem} * \Delta T_{te} \quad 10$$

$$r_{tem} = \left( \frac{\rho * l}{A} \right) * n_{pn} \quad 11$$

TEM'in yük altındaki akımı ( $I_L$ );

$$I_L = \frac{V_{oc,TEM}}{r_{TEM} + R_L} \quad 12$$

Kullanıcı tanımlı yük direnci ( $R_L$ ), TEM'in yük altındaki çıkış gerilimi ( $V_L$ );

$$V_L = I_L * R_L \quad 13$$

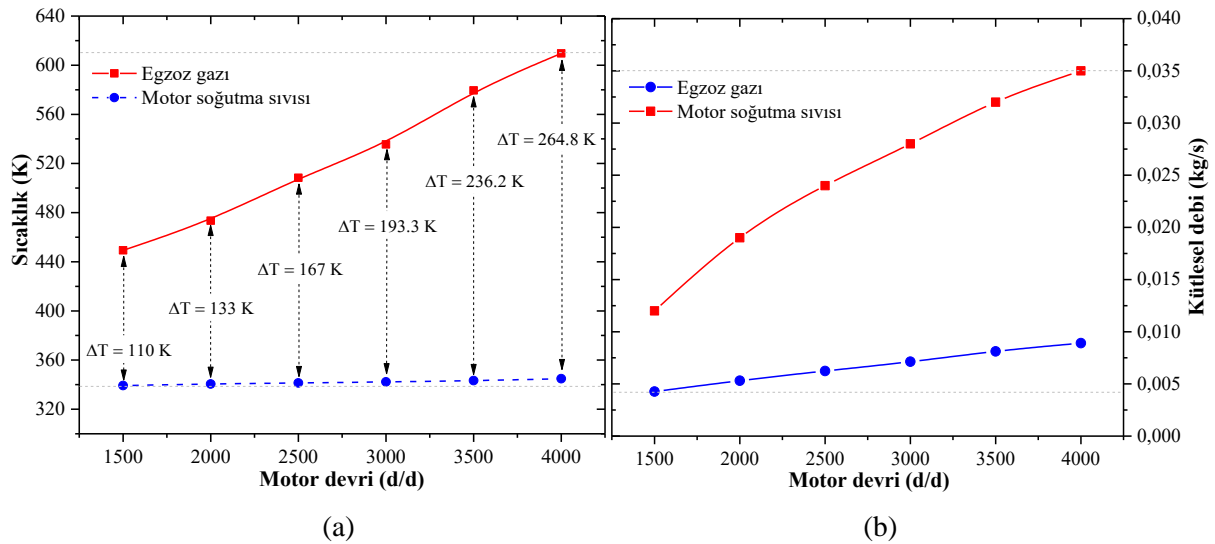
TEM'in yük altındaki çıkış gücü ( $P_L$ );

$$P_L = I_L^2 * R_L \quad 14$$

### 3. BULGULAR ve TARTIŞMA (FINDINGS AND DISCUSSION)

Çalışmada, yazarların daha önceki deneysel çalışmalarda, 505 cc toplam silindir hacmine sahip 2 silindirli, buji ateşlemeli, su soğutmalı motordan elde ettikleri egzoz gazı ve soğutma suyuna ait sayısal değerler (sıcaklık ve debi) [20] ve 1-14 numaralı eşitlikler kullanılarak Matlab/Simulink programında oluşturulan teorik model [21] kullanılmıştır. LPG ile çalışan deney motorun 1500-4000 d/d aralığındaki egzoz gazı ve MSS ait deneysel sonuçlar Şekil 3'te verilmektedir. Teorik TEJ modelinde, Şekil 3'te verilen egzoz gazı ve MSS'na ait deneysel sonuçlar kullanılmıştır.

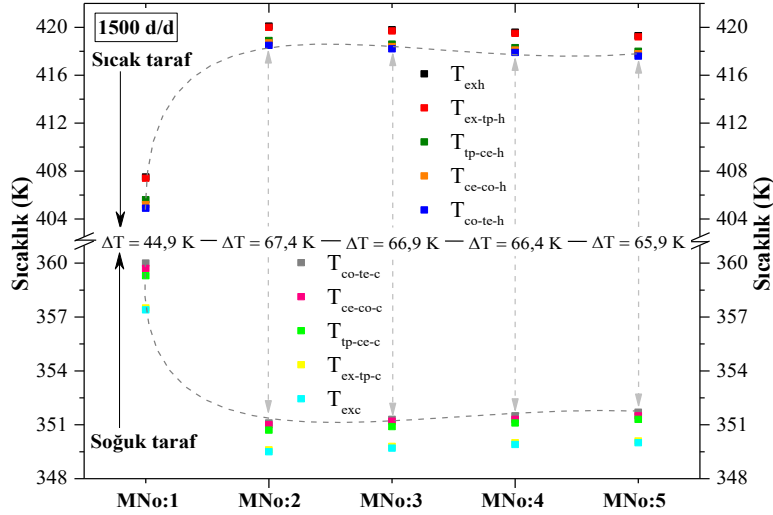
Şekil 3(a)'da görüldüğü gibi motor devrinin 1500 d/d'dan 4000 d/d'ya çıkartılması ile egzoz gazlarının sıcaklığı lineer olarak artış gösterirken MSS sıcaklığı çok düşük oranda artmakta ve buna bağlı olarak  $\Delta T$  sıcaklık farkı da artmaktadır. Şekil 3(b)'de görüldüğü gibi motor devrinin artışı ile birlikte egzoz gazı ve MSS'nun debileri motorun tasarım yapısına bağlı olarak artış göstermektedir.



**Şekil 3.** Farklı motor devirleri için teorik modelde kullanılan TEJ'e ait (a) egzoz gazı ve MSS giriş sıcaklıkları (b) egzoz gazı ve MSS giriş debileri (Gürbüz ve Akçay, 2015)

Şekil 4'te farklı yarı iletken malzemelerden oluşturulan p-n çiftleri için motorun 1500 d/d devrindeki egzoz gazı ve MSS değerleri kullanılarak hesaplanan TEM'in katmanları üzerine düşen sıcaklık değerlerin değişimi verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi TEM'de kullanılan yarı iletken p-n çiftlerindeki malzeme özelliklerine bağlı olarak katmanlar üzerine düşen sıcaklıklar değerleri değişmektedir. Aynı sıcak ve soğuk taraf sıcaklıklarına için en yüksek sıcaklık farkının  $\Delta T = 67,4$  ile MNo:2'de oluşturulan p-n kombinasyonu (p:  $\text{Bi}_{0,3}\text{Sb}_{1,7}\text{Te}_3$  ve n:  $\text{PbSe}_{0,5}\text{Te}_{0,5}$ ) ile elde edildiği görülmektedir.

Motorun 2000-4000 d/d aralığı için TEM'in katmanları üzerine düşen sıcaklık değerlerin değişimi Tablo 3'de verilmektedir. Tablo 3'te motorun 2000-4000 d/d aralığındaki egzoz ve MSS değerleri kullanılarak hesaplanan sonuçlar incelendiğinde, en yüksek  $\Delta T$  sıcaklık farkının MNo:2'de oluşturulan p-n çifti ile elde edilirken en düşük  $\Delta T$  sıcaklık farkı MNo:1'de oluşturulan p-n çifti ile elde edildiği görülmektedir.

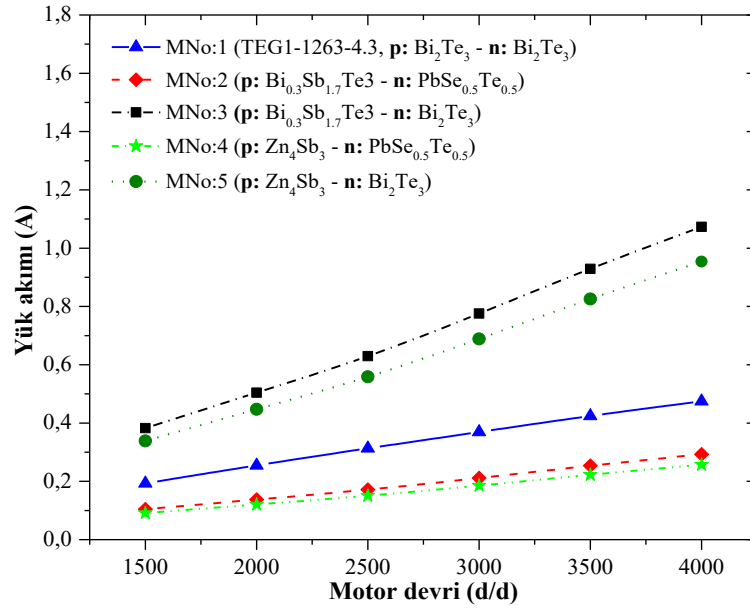


Şekil 4. 1500 d/d’da farklı malzeme özellikleri için hesaplanan sıcaklık değerlerinin değişimi

Tablo 3. Farklı motor devri ve farklı p-n çiftleri için hesaplanan sıcaklık değerleri

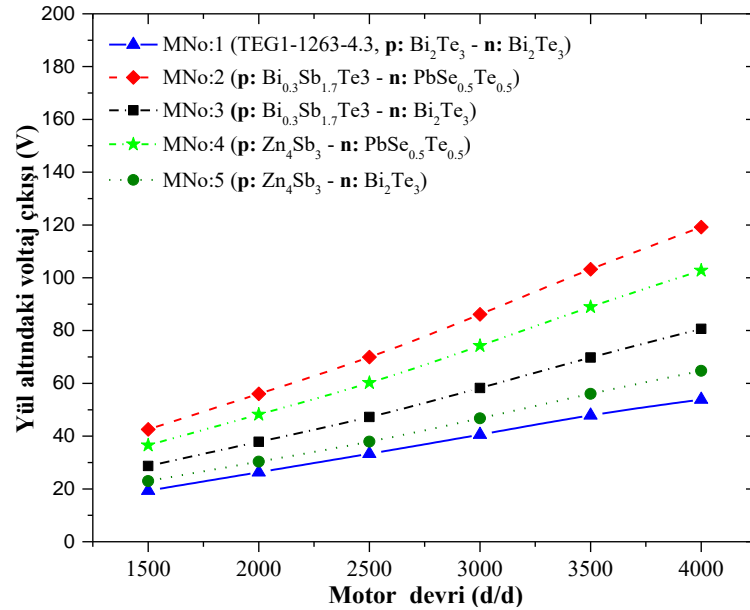
		1500 d/d					2000 d/d				
		MNo:	MNo:	MNo:	MNo:	MNo:	MNo:	MNo:	MNo:	MNo:	MNo:
Sıcak taraf	T <sub>ex</sub>	407.4	420	419.7	419.5	419.2	427	443.1	442.8	442.4	442.1
	T <sub>ex-</sub>	407.4	420	419.7	419.5	419.2	427	443.1	442.7	442.4	442
	T <sub>in-</sub>	405.6	418.9	418.6	418.3	418	424.5	441.6	441.2	440.9	440.5
	T <sub>ce-</sub>	405.2	418.7	418.4	418.1	417.8	424	441.3	440.9	440.6	440.2
	T <sub>co-</sub>	404.9	418.5	418.2	417.9	417.6	423.6	441.1	440.7	440.3	440
ΔT(K)		44.9	67.4	66.9	66.4	65.9	61	88.8	88.1	87.5	87
Soğuk taraf	T <sub>co-</sub>	360	351.1	351.3	351.5	351.7	362.6	352.3	352.6	352.8	353
	T <sub>ce-</sub>	359.7	351	351.2	351.3	351.5	362.3	352.1	352.3	352.5	352.8
	T <sub>in-</sub>	359.3	350.7	350.9	351.1	351.3	361.7	351.8	352	352.2	352.4
	T <sub>ex-</sub>	357.5	349.6	349.8	350	350.1	359.3	350.3	350.5	350.7	350.9
	T <sub>ex</sub>	357.5	349.6	349.8	349.9	350.1	359.2	350.3	350.5	350.7	350.9
		2500 d/d					3000 d/d				
		MNo:	MNo:	MNo:	MNo:	MNo:	MNo:	MNo:	MNo:	MNo:	MNo:
Sıcak taraf	T <sub>ex</sub>	448.6	468	467.6	467.2	466.8	474.7	497.7	497.2	496.8	496.3
	T <sub>ex-</sub>	448.5	467.9	467.5	467.1	466.7	474.6	497.7	497.1	496.7	496.2
	T <sub>in-</sub>	445.4	466.1	465.7	465.3	464.8	470.6	495.4	494.9	494.4	493.9
	T <sub>ce-</sub>	444.7	465.7	465.3	464.9	464.4	469.8	494.9	494.4	493.9	493.4
	T <sub>co-</sub>	444.2	465.5	465	464.6	464.1	469.2	494.6	494	493.5	493
ΔT(K)		77.5	110.9	110.1	109.4	108.7	96.7	136.5	135.6	134.8	134
Soğuk taraf	T <sub>co-</sub>	366.7	354.6	354.9	355.2	355.4	372.5	358.1	358.4	358.7	359
	T <sub>ce-</sub>	366.3	354.4	354.6	354.9	355.1	371.9	357.8	358.1	358.3	358.7
	T <sub>in-</sub>	365.6	354	354.2	354.5	357.7	371.1	357.3	357.6	357.8	358.2
	T <sub>ex-</sub>	362.4	352.2	352.4	352.6	352.8	367.1	355	355.3	355.5	355.8
	T <sub>ex</sub>	362.4	352.1	352.4	352.6	352.8	367.1	355	355.3	355.5	355.8
		3500 d/d					4000 d/d				
		MNo:	MNo:	MNo:	MNo:	MNo:	MNo:	MNo:	MNo:	MNo:	MNo:
Sıcak taraf	T <sub>ex</sub>	502.6	529.2	528.6	528.1	527.5	528.6	558.5	557.9	557.3	556.6
	T <sub>ex-</sub>	502.4	529.1	528.5	528	527.4	528.4	558.4	557.8	557.2	556.6
	T <sub>in-</sub>	497.7	526.4	525.8	525.2	524.6	522.9	555.3	554.6	554	553.3
	T <sub>ce-</sub>	496.6	525.8	525.2	524.6	524	521.7	554.7	553.9	553.3	552.6
	T <sub>co-</sub>	495.9	525.4	524.7	524.2	523.5	520.9	554.2	553.4	552.8	552.1
ΔT(K)		117.1	163.5	162.4	161.6	160.5	136.5	188.9	187.6	186.7	185.6
Soğuk taraf	T <sub>co-</sub>	378.8	361.9	362.3	362.6	363	384.4	365.3	365.8	366.1	366.5
	T <sub>ce-</sub>	378.1	361.5	361.9	362.2	362.6	393.6	364.9	365.3	365.6	366
	T <sub>in-</sub>	377	360.9	361.3	361.6	362	382.4	364.2	364.6	364.9	365.3
	T <sub>ex-</sub>	372.3	358.3	358.6	358.8	359.1	376.8	361.1	361.4	361.7	362.1
	T <sub>ex</sub>	372.2	358.2	358.5	358.8	359.1	376.7	361	361.4	361.7	362

Şekil 5'te motorun farklı devirlerinden alınan egzoz gazı ve MSS değerleri kullanılarak farklı p-n tipi yarı iletken çiftleri için hesaplanan yük akımının motor devrine bağlı değişimi verilmiştir. Tüm motor devirleri için, MNo:3 ile tanımlanan p-n çiftinden oluşturulan TEM modülü ile TEJ yük akımı en yüksek değerleri alırken, MNo:4 ile tanımlanan p-n çiftinden oluşturulan TEM modülü ile TEJ yük akımı en düşük değerleri almıştır. Burada dikkati çeken bir diğer önemli sonuç, Tablo 3'te verilen farklı p-n çiftleri için hesaplanan  $\Delta T$  sıcaklık farkı sıralamasının yük akımı sıralamasından farklı olmasıdır. Tüm motor devirleri için en yüksek  $\Delta T$  sıcaklık farkı MNo:2 ile tanımlanan p-n çifti ile elde edilirken en yüksek yük akımı çıkışı MNo:3 ile tanımlanan p-n çifti ile elde edilmiştir. Bu sonuç, TEM'lerde yük akımı çıkışının yalnızca yarı iletken malzemeler üzerine düşen sıcaklık farkına bağlı olmadığını, aynı zamanda yarı iletken malzemelerin elektriksel özelliklerinin de çıkış akımı üzerinde etkili olduğunu göstermektedir.



Şekil 5. Farklı motor devri ve malzeme özellikleri ile TEJ'in yük akımının değişimi

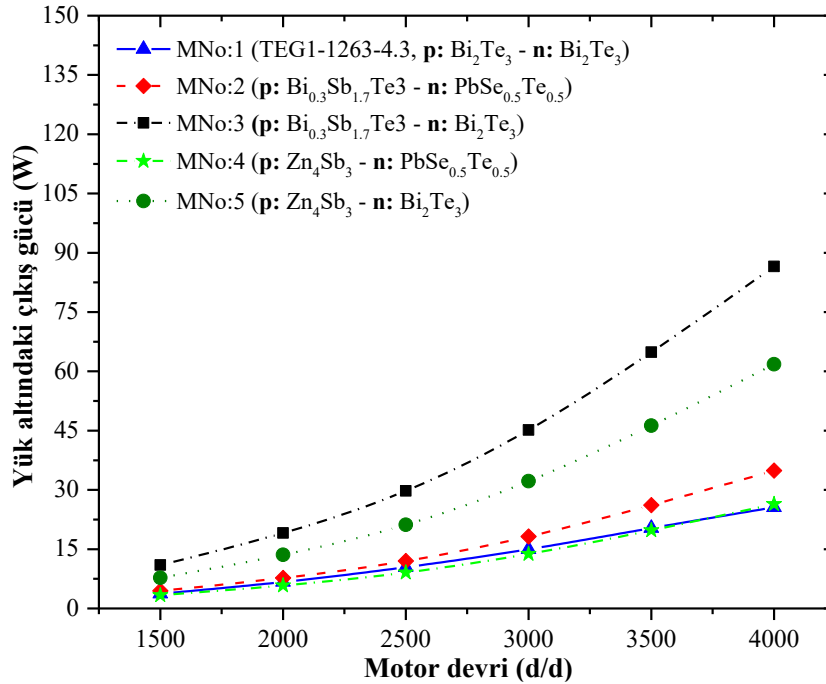
Motorun farklı devirlerinden alınan egzoz gazı ve MSS değerleri kullanılarak farklı p-n tipi yarı iletken çiftleri için hesaplanan yük altındaki çıkış voltajının motor devrine bağlı değişimi Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. Farklı motor devri ve malzeme özellikleri ile TEJ'in yük altındaki çıkış voltajının değişimi

Tüm motor devirleri için MNo:2 ile tanımlanan p-n çiftinden oluşturulan TEM modülü ile TEJ yük altındaki voltaj değeri en yüksek değerleri alırken, MNo:1 ile tanımlanan p-n çiftinden oluşturulan TEM modülü ile TEJ'in yük altındaki voltaj değeri en düşük değerleri almıştır. Şekil 6'da görüldüğü gibi, farklı yarı iletken malzemeden oluşturulan p-n çiftleri için yük altındaki çıkış voltaj sıralaması Tablo 3'te verilen  $\Delta T$  sıcaklık farkına bağlı olarak değişmektedir.  $\Delta T$  sıcaklık farkının artışı ile yük altındaki çıkış voltajı da artmaktadır.

Şekil 7'de motorun farklı devirlerindeki egzoz gazı ve MSS değerleri kullanılarak farklı p-n tipi yarı iletken çiftleri için hesaplanan yük altındaki çıkış gücünün değişimi verilmektedir. Şekil 7'de görüldüğü gibi elektriksel formülasyon olarak yük akımı ile yük altındaki çıkış voltajının çarpımından hesaplanan yük altındaki çıkış gücü sıralaması;  $\Delta T$  sıcaklık farkı, yük akımı ve yük altındaki çıkış voltajında ortaya çıkan sıralamadan farklı bir karaktere sahip olmuştur. Tüm motor devirlerinde,  $\text{Bi}_{0,3}\text{Sb}_{1,7}\text{Te}_3$  tip yarı iletken malzemenin p tipi,  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  tipi yarıiletken malzemenin n tipi olarak seçildiği p-n çifti (MNo:3) ile oluşturulan TEM modülleri (20 adet) ile en yüksek yük altındaki çıkış gücü (4000 d/d'da 86,56 W) elde edilirken, MNo:1 (p ve n:  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ) ve MNo:4 (p:  $\text{Zn}_4\text{Sb}_3$ , n:  $\text{Bi}_{0,3}\text{Sb}_{1,7}\text{Te}_3$ ) ile belirtilen p-n çiftlerine sahip TEM modülleri ile en düşük yük altındaki çıkış gücü (4000 d/d'da  $\approx 26$  W) elde edilmiştir. Kullanılan p-n tipi yarı iletken malzeme türleri arasında bir karşılaştırma yapıldığında, MNo:1, MNo: 3 ve MNo: 5'deki 3 p-n çiftinde de n:  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  tipi yarı iletken malzeme kullanılmış, ancak MNo: 3 ile en yüksek yük altında çıkış gücü elde edilirken (4000 d/d'da 86,56 W) MNo:1 ile en düşük yük altında çıkış gücü (4000 d/d'da 25,58 W) elde edilmiştir. Ayrıca MNo:5 (p:  $\text{Zn}_4\text{Sb}_3$ , n:  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ) ile MNo:3'den sonraki en yüksek TEM çıkış gücü (4000 d/d'da 61,8 W) elde edilmiştir. Bu durum,  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ 'in TEM'in çıkış performansı açısından iyi bir n tipi yarı iletken malzeme olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte,  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ 'ün p-tipi yarı iletken olarak kullanılmasının (MNo:1) TEM'in çıkış performansını azalttığı görülmektedir. Buna karşın, kullanılan yarı iletken malzemeler arasında TEM çıkış performansı açısından en uygun p-tipi yarı iletken malzemenin  $\text{Bi}_{0,3}\text{Sb}_{1,7}\text{Te}_3$  olduğu,  $\text{Zn}_4\text{Sb}_3$ 'ün ise p tipi yarı iletken olarak tatmin edici sonuçlar ortaya koyduğu tespit edilmiştir. Öte yandan, p:  $\text{Bi}_{0,3}\text{Sb}_{1,7}\text{Te}_3$  ve n:  $\text{PbSe}_{0,5}\text{Te}_{0,5}$  yarı iletken malzemelerden oluşan p-n çiftine (MNo:2) sahip TEM'in düşük yük altındaki çıkış gücü (4000 d/d'da 34,9 W) performansı,  $\text{PbSe}_{0,5}\text{Te}_{0,5}$ 'ün n-tipi yarı iletken malzeme olarak tatmin edici performans sunmadığını göstermektedir. Çalışmanın genel bir sonucu olarak, kullanılan yarı iletken p-n çiftleri arasında, p:  $\text{Bi}_{0,3}\text{Sb}_{1,7}\text{Te}_3$  ve n:  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  tipi yarıiletken malzemeler ile oluşturulan p-n çifti yapısının TEM'in ve dolayısıyla TEJ'in çıkış performansı açısından en uygun p-n çifti yarı iletken malzeme kombinasyonu olduğu görülmektedir.



Şekil 7. Farklı motor devri ve malzeme özellikleri ile TEJ'in yük altındaki çıkış gücünün değişimi



#### 4. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada, yakıt olarak LPG kullanan 2 silindri, buji ateşlemeli ve su soğutmalı motorun 1500-4000 d/d aralığında gerçekleştirilen deneysel sonuçları [20] kullanılarak gerçekleştirilen teorik analizde, egzoz atık ısı enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürülmesi için tasarlanmış TEJ'de farklı p-n tipi yarı iletken malzeme kullanımının TEJ'in elektriksel çıkış parametreleri üzerine etkisi, geliştirilen teorik TEJ modeli [21] kullanılarak araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- Genel olarak, kullanılan p-n tipi yarı iletken malzeme çiftleri ile oluşturulan TEM'lerde, motorun devir artışı ile birlikte egzoz gazlarının sıcaklık ve debi değerlerinin artmasına bağlı olarak yarı iletken malzeme üzerine düşen sıcaklık değeri artarak  $\Delta T$  değerinin artmasına ve dolayısıyla TEM'in elektriksel çıkış parametrelerinin artmasına sebep olmuştur.
- Tüm motor devirleri için, kullanılan p-n çifti yarı iletken malzemelerin ısıl iletkenlik değerlerine bağlı olarak, MNo:2 ile en yüksek, MNo:1 ile en düşük malzeme üzerine düşen sıcaklık değerleri elde edilmiştir. Yarı ilerken malzeme üzerin düşen sıcaklık değeri sıralaması MNo:2>MNo:3>MNo:4>MNo:5>MNo:1 şeklinde gerçekleşmiştir.
- Tüm motor devirleri için, MNo:3 ile en yüksek ve MNo:4 ile en düşük yük akımı değeri elde edilmiştir. Kullanılan p-n tipi yarı iletken malzeme çiftlerinin kombinasyonlarından oluşturulan TEM'den 20 adet seri bağlanarak oluşturulan TEJ'in yük akımı sıralaması, MNo:3>MNo:5>MNo:1>MNo:2>MNo:4 şeklinde gerçekleşmiştir.
- Tüm motor devirleri için, MNo:2 ile en yüksek ve MNo:1 ile en düşük yük voltajı değeri elde edilmiştir. Kullanılan p-n tipi yarı iletken malzeme çiftlerinin kombinasyonlarından oluşturulan TEM'den 20 adet seri bağlanarak oluşturulan TEJ'in yük voltajı sıralaması, MNo:2>MNo:4>MNo:3>MNo:5>MNo:1 şeklinde gerçekleşmiştir.
- Elektriksel olarak Güç = Akımı x Voltaj formülasyonu ile hesaplanan TEM'in yük altındaki çıkış gücü sıralaması;  $\Delta T$  sıcaklık farkı, yük akımı ve yük altındaki çıkış voltajında sıralamalarından farklı bir karaktere sahip olmuştur. Tüm motor devirleri için, farklı p-n çiftlerinin kombinasyonundan oluşturulan TEM'den 20 adet seri bağlanarak oluşturulan TEJ'in yük altındaki güç çıkışı sıralaması, MNo:3>MNo:5>MNo:2>MNo:2≈MNo:1 şeklinde gerçekleşmiştir.
- Çalışma kapsamında kullanılan p-n tipi yarı iletken malzemelerden p: Bi<sub>0,3</sub>Sb<sub>1,7</sub>Te<sub>3</sub> ve n: Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> tipi yarı iletkenler kullanılarak oluşturulan p-n çifti yapısının TEM'in ve dolayısıyla 20 adet TEM'in seri olarak bağlanması ile oluşturulan TEJ'in çıkış performansı açısından en uygun p-n çifti kombinasyonu olduğu tespit edilmiştir.

Sonuç olarak, ticari olarak piyasadan temin edilebilen ve yalnızca Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> tabanlı p-n çiftlerinden oluşan TEM'lere alternatif olarak kullanılan Bi<sub>0,3</sub>Sb<sub>1,7</sub>Te<sub>3</sub>, PbSe<sub>0,5</sub>Te<sub>0,5</sub> ve Zn<sub>4</sub>Sb<sub>3</sub> yarı iletken çiftlerinin kombinasyonlarından oluşturulan p-n çiftleri ile oluşturulan TEM'lerin daha yüksek elektriksel çıkış performansı sunmaktadır. Bununla birlikte, TEM'lerde kullanılan Pb tabanlı yarı iletken malzemelerin, piyasada ticari ürün olarak bulunan Bi tabanlı yarı iletken malzemelere yakın bir performans göstermektedir. Fakat Pb tabanlı yarıiletken malzemeler, Sb tabanlı yarıiletken malzemelere kıyasla daha düşük bir performans sergilemiştir. Özellikle, Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> tabanlı malzemeler yerine Bi ve Sb tabanlı yarı iletken malzeme alaşımlarının kombinasyonları ile daha yüksek elektriksel çıkış elde edilmiştir.

#### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)



Bu çalışmada, Doç. Dr. Habib Gürbüz'ün danışmanlığında Topalci (2017) tarafından gerçekleştirilen Yüksek Lisans tezi kapsamında Matlab/Simulink programında oluşturulan teorik TEJ modelinin geliştirilmiş versiyonu kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan Matlab/Simulink programı 2017 yılı için Ümit TOPALCI adına lisanslıdır.

**KAYNAKLAR (REFERENCES)**

- [1] Mruk, A., Jordan, W., Taler, J., Lopata, S. and Weglowski, B. (1994). Heat Transfer Through Ceramic Barrier Coatings Used in Internal Combustion Engines. SAE Technical Paper, No: 941779, USA.
- [2] Taymaz, İ., Çakır, K., Gür, M. and Mimaroglu A. (2003). Experimental Investigation of Heat Losses in a Ceramic Coated Diesel Engine. *Surface and Coatings Technology*, 168-170.
- [3] Gökçek, M. (2017). Waste to Energy: Exploitation of Landfill Gas in Micro-Turbines. *Omer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences*, 6(2), 710-716.
- [4] Rowshanzadeh, R. (2008). Performance and Cost Evaluation of Organic Rankine Cycle at Different Technologies. KTH Vetenskapp Och Konst., Department of Energy Technology, M.Sc. Thesis, 101pages, Sweden.
- [5] Yıldırım, İ., Öner, D. and Çetin, B. (2015). GPU-Computation of 2-Dimensional Laplace Equation Using Boundary Element Method. 20th National Conference on Thermal Sciences, 2-5 September, Balıkesir, Turkey.
- [6] Okada, Y., Koseki, T. and Sone, S. (2003). Energy Management for Regenerative Brakes on a DC Feeding system. International Symposium on Speed-up and Service Technology for Railway and Maglev Systems, 19-22 August, Tokyo, Japan, 84-88.
- [7] Yang, Z., Stobart, R., Lan, S., Mason, B. and Winward E. (2018). Towards optimal performance of a thermoelectric generator for exhaust waste heat recovery from an automotive engine. SAE Technical Paper, No. 2018-01-0050.
- [8] Fagehi, H., Attar, A. and Lee, H. (2018). Optimal design of an automotive exhaust thermoelectric generator. *Journal of Electronic Materials*, 47(7), 3983-3995.
- [9] Sifi, I., Ghellai, N., Hima, A., Menni, Y., Chamkha, A.J. and Lorenzini, G. (2019). Study of Temperature Variation Effect on the Thermoelectric Properties of a Thermoelectric Generator with BiCuSeO Molecules. *Journal: <http://iieta.org/journals/ijht>*, 37(3), 727-732.
- [10] Britoa, F.P., Pacheco, N., Vieiraa, R., Martinsa, J., Martinsa, L., Teixeiraa, J., Goncalvesd, L.M., Oliveirab, J. and Hallc, M.J. (2020). Efficiency improvement of vehicles using temperature-controlled exhaust thermoelectric generators. *Energy Conversion and Management*, Vol. 203.
- [11] Pacheco, N., Brito, F.P., Vieira, R., Martins, J., Barbosa, H. and Goncalves, L.M. (2020). Compact automotive thermoelectric generator with embedded heat pipes for thermal control. *Energy*, Vol. 197.
- [12] Massaguer, A., Pujol, T., Comamala, M. and Massaguer, E. (2019). Feasibility study on a vehicular thermoelectric generator coupled to an exhaust gas heater to improve aftertreatment's efficiency in cold-starts. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 167.
- [13] Wang, J., Song, X., Li, Y., Zhang, C., Zhao, C. and Zhu, L. (2020). Modeling and Analysis of Thermoelectric Generators for Diesel Engine Exhaust Heat Recovery System. *Journal of Energy Engineering*, Vol. 146 Issue 2.
- [14] Subramaniam, H., Duraisamy, S., Raghavan, G. and Govindan, S. (2019). Design and development of a test rig for the performance evaluation of automotive exhaust thermoelectric generator. *AIP Advances*, 9.
- [15] Kunt, M.A. and Gunes, H. (2019). Comparing the recovery performance of different thermoelectric generator modules in an exhaust system of a diesel engine both experimentally and theoretically. *Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*.
- [16] Quan, R., Liu, G., Zhou, W. and Huang, L. (2018). Energy Management of Automobile Exhaust Thermoelectric Hybrid Power Based on Maximum Power Point Tracking and Fuzzy Logic Control. 2nd International Forum on Management, Education and Information Technology Application.

- [17] Shiriaev, P., Shishov, K. and Osipkov, A. (2019). Electrical network of the automotive multi-sectional thermoelectric generator with MPPT based device usage. *Materials Today: Proceedings*, 8, 642-651.
- [18] Quan, R., Wang, C., Wu, F., Chang, Y. and Deng, Y. (2019). Parameter Matching and Optimization of an ISG Mild Hybrid Powertrain Based on an Automobile Exhaust Thermoelectric Generator. *Journal of Electronic Materials*.
- [19] Thacher, E.F., Helenbrook, B.T., Karri, M.A. and Richter, C.J. (2007). Testing of an automobile exhaust thermoelectric generator in a light truck. *Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*.
- [20] Gürbüz, H. and Akçay, H. (2015). Experimental investigation of an improved exhaust recovery system for liquid petroleum gas fueled spark ignition engine. *Thermal Science*, 19(6), 2049-2064.
- [21] Topalçı, Ü. (2017). Taşıt Egzoz Gazı Atık Isı Enerjisinden Elektrik Enerjisinin Üretilmesi için Termoelektrik Jeneratörün Modellenmesi. SDÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi.
- [22] Su, Q. (2017). Modeling and simulation of a segmented thermoelectric generator. Doctoral dissertation, University of Missouri--Columbia.

## The Effect of B<sub>4</sub>C Reinforcement Ratio and Secondary Sintering Processes on Properties of Al6061 Matrix MMC<sub>p</sub> Materials

 Türcan KIYMAZ  Yusuf ÖZÇATALBAŞ 

Gazi University Faculty of Technology, Department of Metallurgy and Materials Engineering, 06500, Beşevler / ANKARA

### Graphical/Tabular Abstract

#### Article Info:

Research article

Received: 02/05/2020

Revision: 18/06/2020

Accepted: 03/07/2020

#### Highlights

- Hot Pressing
- SLPS

#### Keywords

 Powder Metallurgy  
 Al6061  
 B<sub>4</sub>C  
 Hot Pressing  
 MMC<sub>p</sub>  
 Supersolidus Liquid Phase  
 Sintering

**Purpose:** In this study, the effect of reinforcement ratio and liquid phase sintering on properties of Al6061 matrix B<sub>4</sub>C particle reinforced Metal Matrix Composite (MMC<sub>p</sub>) materials produced by hot pressing active sintering method was investigated.

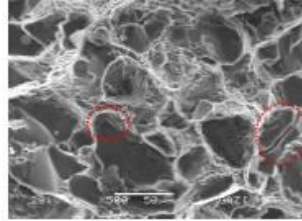


Figure A. SEM micrograph of 610S coded MMC<sub>p</sub> material

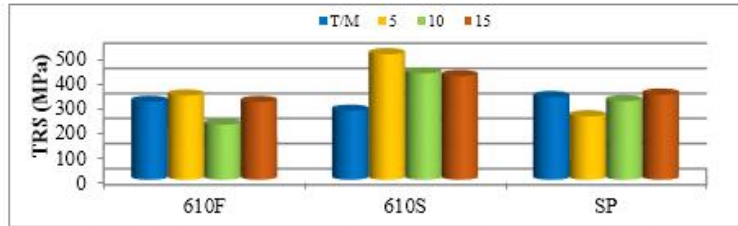


Figure B. Comparison of TRS values of P/M and MMC<sub>p</sub> materials

**Theory and Methods:** Pre-alloyed Al6061 metal powder with 0%, 5%, 10% and 15% (wt) B<sub>4</sub>C ceramic particle reinforcing elements were mixed in the turbula device for 45 minutes. The mixture powder was compressed in the mold in dimensions 40x60mm<sup>2</sup> at a pre-pressing pressure of 200 MPa at room temperature. Subsequently, lubricant removal process was applied for 45 minutes at 400°C under argon atmosphere in the same mold block. Then, MMC<sub>p</sub> materials were produced by applying hot pressing (HP) active sintering under argon atmosphere for 1 hour under pressure of 100 MPa at 550°C. Secondary sintering was performed on these samples by applying supersolidus liquid-phase sintering (SLPS) for 1 hour at 610°C. Microstructures and physical properties of composite materials produced; characterized by metallographic examination, hardness and density measurements, transverse rupture strength (TRS) test and fracture surface analysis by scanning electron microscopy (SEM).

**Results:** At the end of the SLPS process, the samples were cooled fast in water (W) and slow in the furnace (F), and the effect of the cooling rate was also investigated. SLPS process partially reduced the density of MMC<sub>p</sub> materials produced by HP. This effect is especially high in furnace cooled samples. However, there was a significant increase in the hardness and TRS values of the samples cooled in water quickly.

**Conclusion:** As can be seen in the SEM image given in Figure.A with the SLPS process applied after the hot press, the interface bond in MMC<sub>p</sub> materials is strengthened. This situation caused a significant increase in TRS values, especially in water-cooled samples, as can be seen in the graphic in Figure.B.



## B<sub>4</sub>C Takviye Oranı ve İkincil Sinterleme İşlemlerinin Al6061 Matrisli MMK<sub>p</sub> Malzemelerin Özelliklerine Etkisi

Türkan KIYMAZ<sup>ID</sup> Yusuf ÖZÇATALBAŞ<sup>ID</sup>

Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, 06500, Beşevler / ANKARA

### Öz

Bu deneysel çalışmada, sıcak presleme aktif sinterleme yöntemi ile üretilen Al6061 matrisli B<sub>4</sub>C parçacık takviyeli Metal Matrisli Kompozit (MMK<sub>p</sub>) malzemelerin özelliklerine takviye oranı ve sıvı faz sinterlemenin etkisi araştırılmıştır. Ağırlıkça %0, %5, %10 ve %15 oranlarında B<sub>4</sub>C seramik parçacık takviye elemanları ile ön alaşım Al6061 metal tozu turbula cihazında 45 dakika süre ile karıştırılmıştır. Karışım tozlar, 40x60mm<sup>2</sup> boyutlarındaki kalıp içerisinde oda sıcaklığında 200 MPa ön presleme basıncında sıkıştırılmıştır. Devamında aynı kalıp bloğu içerisinde argon atmosferi altında 400°C sıcaklıkta 45 dakika boyunca yağlayıcı giderme işlemi uygulanmıştır. Ardından, 550°C sıcaklıkta 100 MPa basınç altında 1 saat boyunca argon atmosferi altında sıcak presleme (SP) aktif sinterleme işlemi uygulanarak MMK<sub>p</sub> malzemeler üretilmiştir. Bu numunelere 610°C sıcaklıkta 1 saat süreyle süper katı üzeri sıvı faz sinterleme (SKSS) işleminin uygulanmasıyla ikincil sinterleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Üretilen kompozit malzemelerin mikroyapıları ve fiziksel özellikleri; metalografik muayene, sertlik ve yoğunluk ölçümleri, çapraz kırılma dayanımları (ÇKD) ve kırık yüzey analizi taramalı elektron mikroskopu (SEM) ile karakterize edilmiştir. SKSS işlemi sonunda numuneler suda hızlı (S) ve fırında yavaş (F) soğutulmuş, soğuma hızının etkisi de incelenmeye çalışılmıştır. SKSS işlemi, SP ile üretilen MMK<sub>p</sub> malzemelerin yoğunluğunu kısmen düşürmüştür. Bu etki özellikle fırın ortamında yavaş soğutmaya bırakılan numunelerde daha fazladır. Bununla birlikte suda hızlı soğutulan numunelerin sertlik ve ÇKD değerlerinde önemli miktarda artış meydana gelmiştir.

### Makale Bilgisi

Araştırma makalesi  
 Başvuru: 02/05/2020  
 Düzeltilme: 18/06/2020  
 Kabul: 03/07/2020

### Anahtar Kelimeler

Toz Metalurjisi  
 Al6061  
 B<sub>4</sub>C  
 Sıcak Presleme  
 MMK<sub>p</sub>  
 Süperkatı Üzeri Sıvı Faz  
 Sinterleme

### Keywords

Powder Metallurgy  
 Al6061  
 B<sub>4</sub>C  
 Hot Pressing  
 MMC<sub>p</sub>  
 Supersolidus Liquid Phase  
 Sintering

### The Effect of B<sub>4</sub>C Reinforcement Ratio and Secondary Sintering Processes on Properties of Al6061 Matrix MMC<sub>p</sub> Materials

#### Abstract

In this experimental study, the effect of reinforcement ratio and liquid phase sintering on properties of Al6061 matrix B<sub>4</sub>C particle reinforced Metal Matrix Composite (MMC<sub>p</sub>) materials produced by hot pressing active sintering method was investigated. Pre-alloyed Al6061 metal powder with 0%, 5%, 10% and 15% (wt) B<sub>4</sub>C ceramic particle reinforcing elements were mixed in the turbula device for 45 minutes. The mixture powder was compressed in the mold in dimensions 40x60mm<sup>2</sup> at a pre-pressing pressure of 200 MPa at room temperature. Subsequently, lubricant removal process was applied for 45 minutes at 400°C under argon atmosphere in the same mold block. Then, MMC<sub>p</sub> materials were produced by applying hot pressing (HP) active sintering under argon atmosphere for 1 hour under pressure of 100 MPa at 550°C. Secondary sintering was performed on these samples by applying supersolidus liquid-phase sintering (SLPS) for 1 hour at 610°C. Microstructures and physical properties of composite materials produced; characterized by metallographic examination, hardness and density measurements, transverse rupture strength (TRS) test and fracture surface analysis by scanning electron microscopy (SEM). At the end of the SLPS process, the samples were cooled fast in water (W) and slow in the furnace (F), and the effect of the cooling rate was also investigated. SLPS process partially reduced the density of MMC<sub>p</sub> materials produced by HP. This effect is especially high in furnace cooled samples. However, there was a significant increase in the hardness and TRS values of the samples cooled in water quickly.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

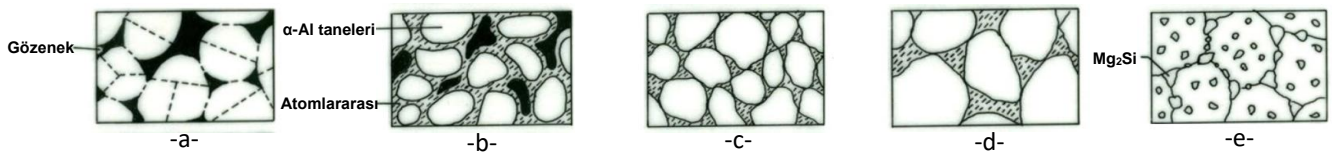
Günümüzde, özellikle havacılık ve otomotiv endüstrilerindeki farklı uygulamalar için hafif ve benzersiz mekanik özellikleri nedeni ile kompozit malzemelerin önemli bir boyut aldığı bilinmektedir [1]. Metal matrisli kompozitlerde Al, Mg ve Ti gibi farklı matris malzemeleri kullanılır. Bunlar arasında Alüminyum; hafifliği, yüksek ısı iletkenliği ve korozyon direnci nedeni ile en çok tercih edilen matris malzemelerinden biri olmuştur [2]. Alüminyum metal matrisli kompozit (MMK) malzemeler, mükemmel korozyon direnci ve mekanik özelliklere sahiptir. Bu özellikler ile otomotiv ve havacılık endüstrileri için uygun bir yapısal malzeme olarak ortaya çıkmıştır [3].

Parçacık takviyeli alüminyum matrisli kompozit (MMK<sub>p</sub>) malzemeler, yüksek mukavemet, düşük ısıl genleşme katsayısı ve iyi aşınma direnci gibi ideal özellikler sağlayan gelişmiş malzeme sınıfıdır. Karıştırılabilir döküm, infiltrasyon ve toz metalurjisi (TM) gibi geniş üretim teknikleriyle MMK<sub>p</sub> malzeme üretimi gerçekleştirilebilir. Günümüz teknolojilerinde toz metalurjisi yöntemi ile üretilen parçaların biçim ve ağırlığına göre sunduğu avantajlar nedeni ile üretim ve araştırma oranı oldukça artmıştır [4, 5, 6]. Matris ve takviye arasındaki istenmeyen reaksiyonları en aza indiren düşük işlem sıcaklığı, takviye partiküllerinin matris içinde mümkün olduğunca homojen dağıtılması ve net şekilli imalata uygunluğu sebebiyle TM avantajlı bir yöntemdir [1].

Saf alüminyum veya alüminyum alaşımlarından oluşan matris Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiC, B<sub>4</sub>C seramik parçacıkları ile güçlendirilir [7]. B<sub>4</sub>C hafif seramik malzeme grubuna ait olup, yüksek sıcaklıklarda ergir, yüksek mekanik özellikler, kimyasal direnç ve nötron emici özellik gösterir. Tüm avantajlarına rağmen, düşük kırılma tokluğu, B<sub>4</sub>C'nin en önemli dezavantajıdır. B<sub>4</sub>C, elmas ve kübik bor nitrürden sonra üçüncü en sert malzemedir, ancak en çok üretilen ve kullanılan sert malzemedir [5, 8]. Al-B<sub>4</sub>C kompozitlerden sert ve düşük yoğunluklu malzeme elde etmek için; B<sub>4</sub>C'nin yüksek sertliği ile Al'nin sünekliği bir araya getirildiğinden endüstrinin ilgisini çekmektedir. Bu MMK<sub>p</sub> malzemeler nötron absorbe eden yapısal kompozit ve zırh plaka malzemeleri için diğer kompozitlere kıyasla daha iyi arayüzey bağına sahiptir [9].

Yüksek performansa ve yüksek oranda yoğunluk değerlerine sahip malzemelerin üretilmesi için sıcak presleme uygun bir yöntemdir [10, 11]. Bu yöntem; nispeten yüksek basınç, düşük sıcaklık (~500-650°C), tam yoğunluk gibi bazı fırsatlar sunar. Aynı zamanda, özel uygulamaların ihtiyaçlarına yönelik özelliklerin uyarlanması için çeşitli matris alaşımlarının uygulanmasıyla birlikte alüminyum matrisli kompozit malzemelerin sentezlenmesine izin verir [12]. Son zamanlarda yapılan çalışmalar, bir sıvı faz oluşumunun TM Al alaşımlarının başarılı şekilde sinterlenmesi için gerekli olduğunu göstermiştir. Alüminyum alaşımlarının yoğunlaşması; yeniden düzenlenme, çözelti yeniden çöktürme ve katı hal sinterlemesi gibi tipik sıvı faz sinter mekanizmasıyla oluşur. Sıvı faz miktarının Al alaşımlarının özellikleri üzerinde önemli etkileri vardır; yetersiz sıvı faz, mekanik özelliklerin yetersiz kalmasına neden olurken aşırı sıvı faz, kompaktın şeklinin deformasyonuna (bozulmasına) neden olur [13, 14].

Son yıllarda, atomizasyon yolu ile Al esaslı ön alaşımlı tozlar geliştirilmiştir. Alüminyum esaslı ön alaşımlı bu toz, yeniden düzenlenme ve diğer difüzyon mekanizmaları yoluyla yoğunlaştırma için bir miktar sıvı üretmek üzere solidus ve liquidus sıcaklık aralığında sinterlenir [3]. Ön alaşımlı tozların kısmi ergime sıcaklıklarına ısıtıldığında hızla yoğunlaşma göstermesi işlemine süper katı üstü sıvı faz sinterleme (SKSS) adı verilmektedir. SKSS, ön alaşımlı tozların solidus ve liquidus sıcaklıkları arasında bir sıcaklıkta uygulanmasıyla gerçekleştirilen sıvı faz sinterleme yöntemidir [15, 16]. Bu işlemde başlangıç tozu bir alaşımdır ve ısıtıldığında her parçacık içinde sıvı oluşur; sıvılar hızlı bir yoğunlaşma sağlar. SKSS'de yoğunlaşma viskoz bir akış işlemidir [17].



**Şekil 1:** SKSS'de meydana gelen yoğunlaşma ve mikroyapısal değişikliklerin şematik çizimi (Schematic drawing of condensation and microstructural changes occurring in SLPS) [18].

Padmavathi ve diğerleri (2011) tarafından yapılan bir çalışmada SKSS'nin şematik olarak gösterimine Şekil 1'de yer verilmiş olup; katı hal sinterleme yolu ile iskelet oluşumu (a), SKSS ile eriyik oluşumu (b), yoğunlaştırma yolu ile parçacık yeniden düzenleme (c), tane yeniden çökmesi (d), soğuma sonrası  $Mg_2Si$  çökmesi (e) şeklindeki aşamalardan oluştuğu gösterilmiştir. Bu yöntemle matris ve takviye parçacıkları arasında ıslatılabilirlik özelliğinin artırılmasıyla güçlü bir arayüzey bağı oluşmaktadır [18]. Yapılan çalışmalarda Al alaşımlarının sinterlenmesi sırasında sıvı faz oluşumunun oksit tabakasının bozulmasına yardımcı olduğu ve yoğunlaşmayı iyileştirdiği; ön alaşımlı Al6061 alaşımında SKSS'nin, sinterlenebilirlik ve mekanik özellikleri geliştirdiği bildirilmiştir [1, 3].

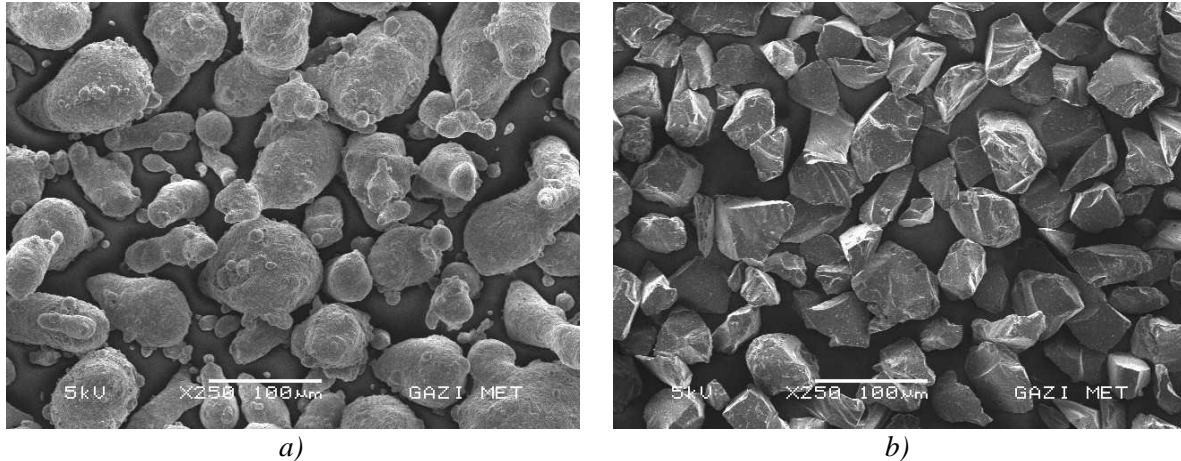
Yapılan bu çalışmada takviye malzemesi olarak  $B_4C$  seramik parçacıkları tercih edilmiş olup matris malzemesi olarak ön alaşımlı Al6061 tozu kullanılmıştır. Temel toz metalurjisi üretim uygulamaları titizlikle gerçekleştirilmiş olup numune üretimleri için sıcak pres yöntemi kullanılmıştır. Üretilen toz metal (T/M) ve  $MMK_P$  malzemelere,  $610 \pm 1^\circ C$  sıcaklıkta SKSS işlemi uygulanmıştır. Böylelikle takviye oranının ve  $610 \pm 1^\circ C$  sıcaklıkta uygulanan SKSS işlemlerinin, matris/takviye arayüzey bağına, mekanik ve fiziksel özelliklerine etkileri araştırılmıştır.

## 2. MALZEME VE DENEYSEL METOD (MATERIALS AND METHOD)

Yapılan deneysel çalışmalarda matris malzemesi olarak gaz atomizasyon metoduyla üretilmiş  $170 \mu m$  altı yağlayıcı Al6061 metal tozları ( $D_{50}=72,7 \mu m$ ) ile takviye malzemesi olarak ise %99,9 saflıkta  $100 \mu m$  altı  $B_4C$  seramik tozları ( $D_{50}=50 \mu m$ ) kullanılmıştır. Matris malzemesi olarak kullanılan Al6061 tozları "Beijing Xing Rong Yuan Technology Company, China" firmasından tedarik edilmiş olup kimyasal analizi Tablo 1'de verilmiştir. Şekil 2'de yer alan SEM görüntülerinde Al6061 parçacıklarının farklı boyutlarda yuvarlak formda,  $B_4C$  parçacıklarının ise keskin köşeli olduğu görülmektedir.

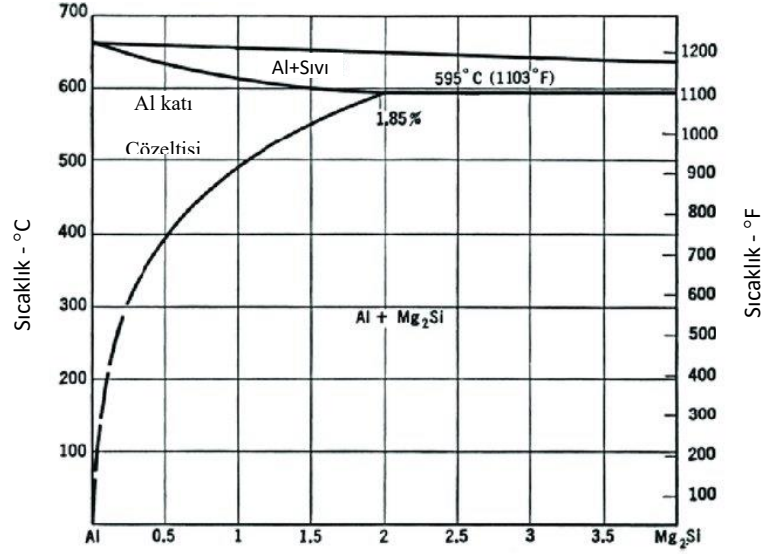
**Tablo 1:** Al6061 tozlarının kimyasal analizi (Chemical analysis of Al6061 powders)

Element	Al	Mg	Zn	Cu	Si	Mn	Ti	Fe	Cr
Analiz (%)	Denge	0,8-1,2	0,25	0,15-0,40	0,6-1,0	0,2-0,8	0,1	0,5	0,1



**Şekil 2:** (a) Al6061 ve (b)  $B_4C$  tozlarına ait SEM görüntüleri (SEM micrographs of (a) Al6061 and (b)  $B_4C$  powders).

Al6061 alaşımı metal tozunun DTA analizinde ergime sıcaklığının  $606^\circ C$ 'de başlayıp,  $648^\circ C$ 'de tamamlandığı belirlenmiştir. Şekil 3'de yer alan Al-Mg<sub>2</sub>Si faz diyagramı kullanılarak alaşımın  $610^\circ C$ 'deki sinterleme işlemi sonucunda %1,2 oranında sıvı faz ve intermetalik çökelti oranı içerdiği hesaplanmıştır.



**Şekil 3:** Klasik Al-Mg<sub>2</sub>Si sözde-ikili faz diyagramı (Classical Al-Mg<sub>2</sub>Si pseudo-binary phase diagram) [19].

Ön alaşımlı Al6061 tozu ve B<sub>4</sub>C seramik takviyelerinin parçacık boyut ölçümleri Malvern Instruments marka Mastersizer 3000 model lazer parçacık ölçüm cihazı ile yapılmıştır. Hassas terazi kullanılarak hazırlanan ağırlıkça %5, %10 ve %15 B<sub>4</sub>C takviyeli ön alaşımlı Al6061 toz karışımları 45 dakika süre ile üç boyutlu turbula cihazında karıştırma işlemine tabi tutulmuştur. Karışım tozlar özel toz şarj hunisi yardımı ile kalıp boşluğuna aktarılmıştır. Oda sıcaklığında 200 MPa basınç altında tek yönlü ön presleme basıncı uygulanarak 40x60x7 mm<sup>3</sup> hacimli, dikdörtgen prizma şeklinde toz T/M ve MMK<sub>p</sub> numuneleri üretilmiştir. Numunelere B<sub>4</sub>C takviye oranlarına bağlı olarak; takviyesiz Al6061 malzeme için T/M ve ağırlıkça %5, %10 ve %15 B<sub>4</sub>C içeren kompozit numuneler için sırası ile 5, 10 ve 15 sayıları kodlanmıştır. Üretilen numunelere Protherm marka atmosfer kontrollü yatay tüp fırınında argon gazı ortamında 400°C sıcaklıkta 45 dakika boyunca bekletilerek yağlayıcı giderme işlemi uygulanmıştır. Ardından 550±5°C sıcaklıkta 100 MPa basınç altında 1 saat boyunca argon atmosferi altında sıcak presleme (SP) aktif sinterleme işlemi uygulanarak MMK<sub>p</sub> malzemeler üretilmiştir. Toz metal ve MMK<sub>p</sub> numuneler Mitsubishi Electric marka CNC tel erozyon cihazında 13x31x7 mm<sup>3</sup> ve 13x9x7 mm<sup>3</sup> ebatlarında olacak şekilde kesilerek test blok numuneleri elde edilmiştir. Elde edilen numunelerden ölçüleri 13x9x7 mm<sup>3</sup> olan numuneler kullanılarak Protherm marka düşey tüp fırınında 610±1°C'de 1 saat süre boyunca SKSS işlemi uygulanması ile ikincil sinterleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Devamında numunelere su ve fırın ortamında soğutma işlemleri uygulanmıştır. İkincil sinterleme işlemi gören numunelerin yoğunluk ölçümleri Arşimet prensibine göre çalışan, 0,1 mg hassasiyette ve üzerinde yoğunluk kiti bulunan Sartorius marka dijital terazide yapılmıştır. Metalografik muayene için tüm numuneler sıcak bakalite alınmış olup numune yüzeylerine zımparalama ve parlatma işlemi uygulanmıştır. Numunelerin sertlik değerlerinin ölçümü Emcotest DuraVision 200 model Brinell sertlik ölçüm cihazında 31,25 kgf yük altında 2,5 mm çapında tungsten bilya uç kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ölçüm değerlerinin güvenilirliği açısından en az üç noktadan ölçüm alınmış olup sonrasında aritmetik ortalamaları hesaplanarak sertlik değerleri belirlenmiştir. Çapraz kırılma dayanım (ÇKD) deneyi için tel erozyon yöntemi ile kesilen T/M ve MMK<sub>p</sub> numunelerin yüzeyleri, 600 mesh'lik SiC zımpara kağıtları ile zımparalanarak yüzey hataları giderilmiştir. Hazırlanan numuneler Instron marka, maksimum 50 kN kapasiteli, çekme ve eğme testi yapabilen bilgisayar kontrollü cihazda, ASTM B 312 standardına uygun deney düzeneği ve aynı standarda uygun ölçülerdeki numuneler kullanılarak yapılmıştır. ASTM B 528-16 standardı referans alınarak yükleme hızı ve maksimum yükleme miktarı belirlenerek ÇKD deneyleri uygulanmıştır. ÇKD deneyi sürecinde numunelerin eğilme şekil değiştirme miktarları dikkate alınarak süneklikleri belirlenmiştir. Numunelerin çapraz kırılma dayanımları ve ÇKD % süneklik değerleri aşağıda yer alan formüller ile hesaplanmıştır.



$$\text{ÇKD} = \frac{3.P.L}{2.t^2.W} \text{ (MPa)}$$

$$\% \text{ Süneklik} = \frac{P.L^3}{4.Y.t^3.W}$$

P: Deney parçasının kırıldığı andaki yük (N)

W: Deney parçasının genişliği (12,6±0,13mm)

L: Destekler arası uzaklık (25,4±0,3mm)

Y: Eğilme şekil değişim miktarı (mm)

t: Deney parçasının kalınlığı (7,4±0,13mm)

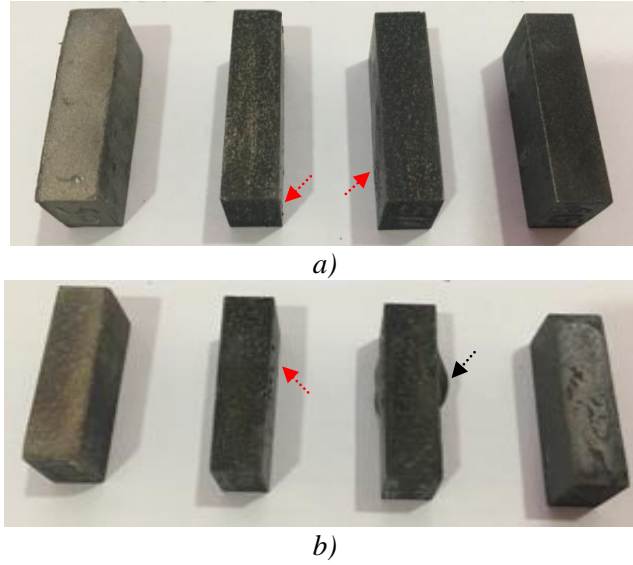
ÇKD: Çapraz kırılma dayanımı (MPa)

ÇKD deneyi sonrasında numunelerin kırık yüzey analizi SEM ile incelenmiştir. 610±1°C'de SKSS sonrası su ortamında ani soğutulan numune grubuna 610S ve fırın ortamında soğutulan numune grubuna ise 610F şeklinde kodlama uygulanmıştır.

### 3. DENEYSEL BULGULAR VE DEĞERLENDİRME (EXPERIMENTAL RESULTS AND DISCUSSION)

#### 3.1 T/M ve MMK<sub>p</sub> Numunelerin Makro Görünümleri (Macro Views of P/M and MMC<sub>p</sub> Samples)

SKSS işlemi yapılan T/M ve MMK<sub>p</sub> numunelerine ait makro görüntüler Şekil 4'de verilmiştir.

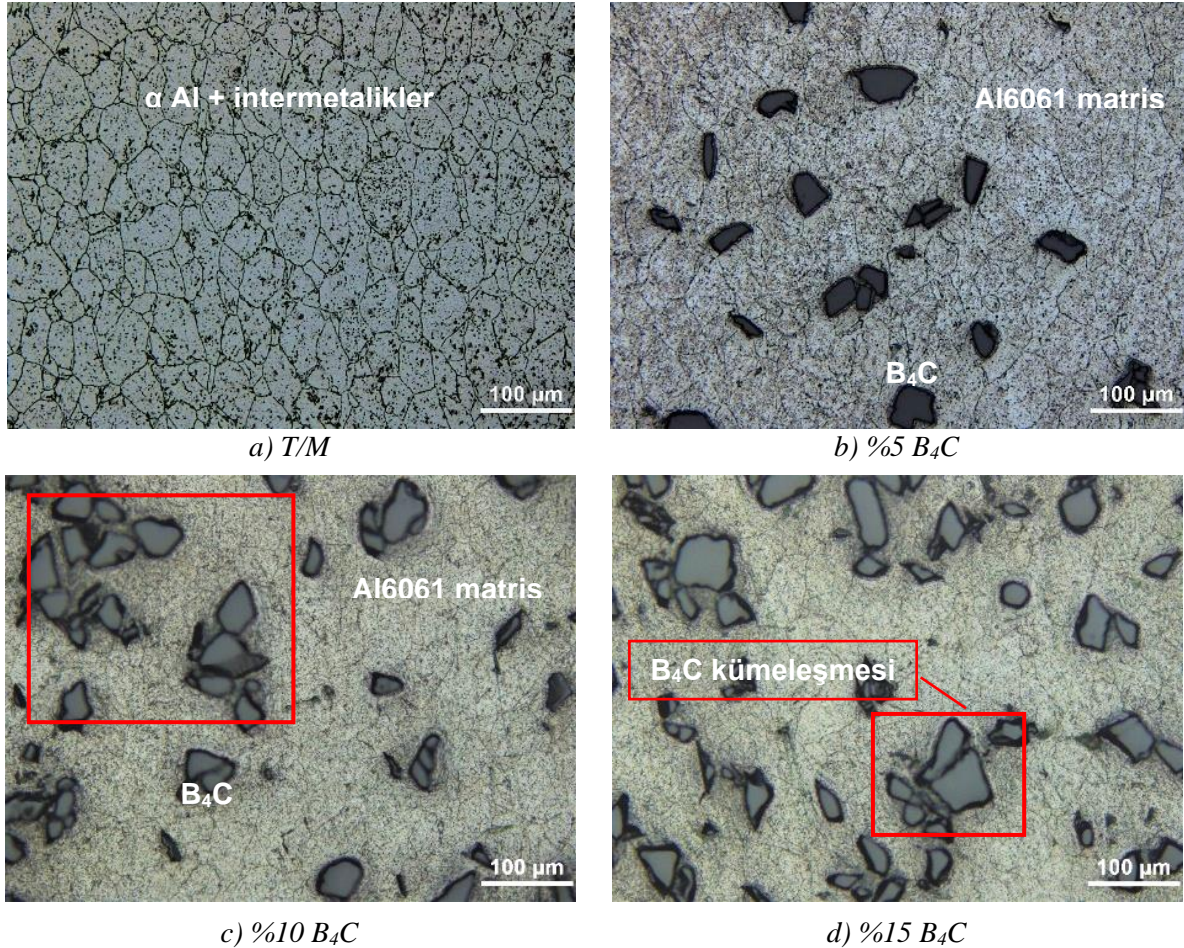


**Şekil 4:** 610°C'de SKSS işlemi sonrası suda (a) ve fırında (b) soğuyan T/M ve MMK<sub>p</sub> numunelerin makro görüntüleri (Sol baştan T/M, %5, %10, %15 B<sub>4</sub>C takviye oranına göre sıralanmıştır). (Macro images of P/M and MMC<sub>p</sub> samples cooling in water (a) and furnace (b) after SLPS at 610°C (P/M, 5%, 10%, 15% B<sub>4</sub>C reinforcement rate from the left side)).

Kırmızı oklar ile gösterilen bölgelerde SKSS işlemi ile oluşturulan sıvı fazın, kapiler kuvvet etkisi ile yüzeylere yayılması (kusması) sonucu oluşan katılaşmış küresel formda kabarcıklar gözlenmiştir. Fırın ortamında soğuyan numune grubunda azalan soğutma hızı ile birlikte kusma oranı ve kabarcık oranında artış gözlenmiştir. Bu durum %10 B<sub>4</sub>C takviyeli MMK<sub>p</sub> malzemede ise yüzey altına toplanmış iri hava kabarcıkları şeklinde meydana gelmiştir (siyah okla gösterilmiştir). Kabarcık boyutları %10 B<sub>4</sub>C'li MMK<sub>p</sub> malzemenin genel biçimini bozacak ve hacimsel genişleme sebebiyle yoğunluğu düşürecek orandadır. Bu oluşumlar, numune yüzeyindeki yüksek yoğunluklu tabaka sebebiyle dış yüzeye yayınamayan sıvı faz ile birlikte boşluk yayılımı ve muhtemel oluşan gaz fazın yoğunlaştığı bölgeler olarak tanımlanabilir. Bununla birlikte, German (2013) ve Padmavathi'nin (2011) belirttiği gibi, belirli bölgelerde aşırı oluşan sıvı faz kompaktın şişmesine ve/veya şeklinin bozulmasına sebep olduğu söylenebilir [15, 18].

### 3.2 T/M ve MMK<sub>p</sub> Numunelerin Mikroyapıları (Microstructures of P/M and MMC<sub>p</sub> Samples)

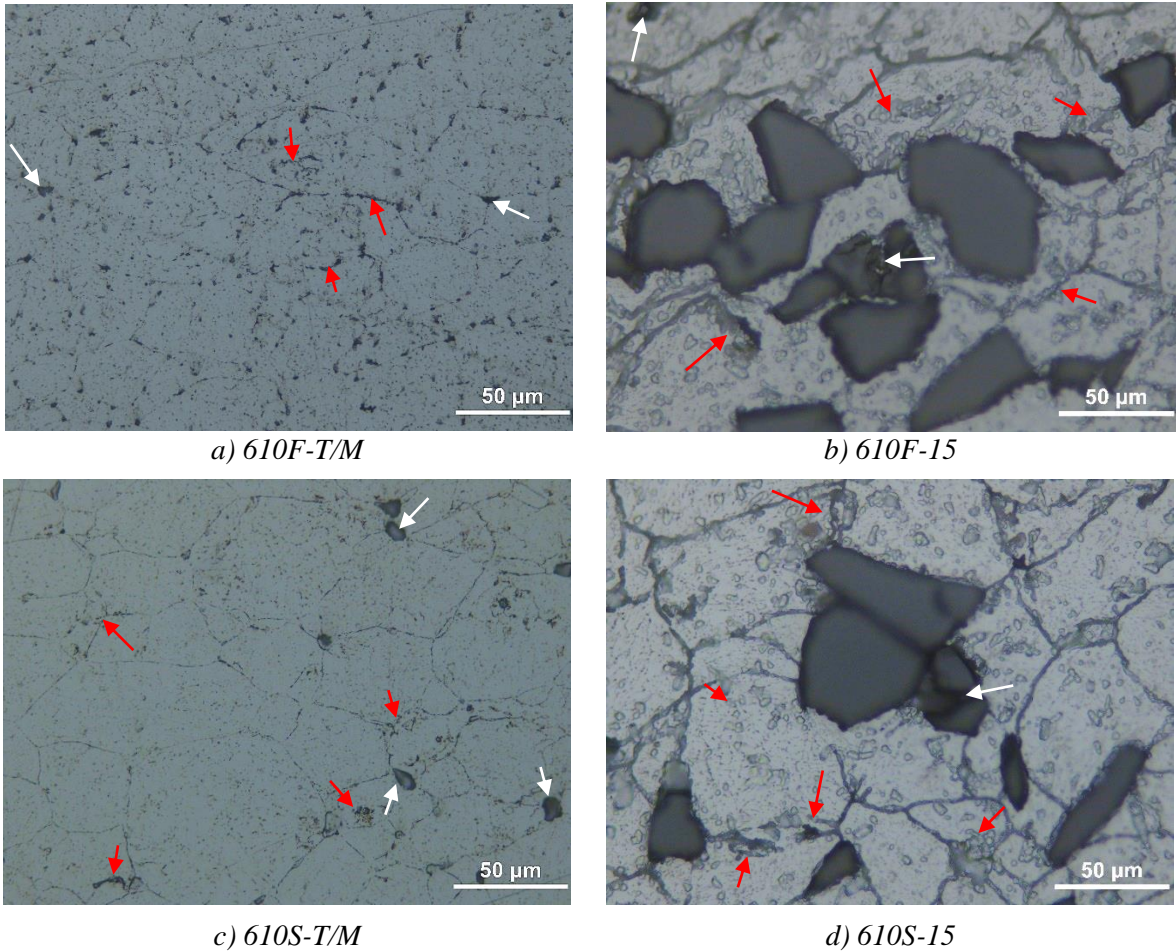
Sıcak presleme aktif sinterleme işlemi uygulanan toz metal T/M ve MMK<sub>p</sub> malzemelere ait optik mikroskop görüntüleri Şekil 5’de verilmiştir. Şekil 5a’da T/M malzemenin mikroyapısında görülen, yer yer tane sınırlarında ve daha çok tane içlerindeki fazların, alaşımdaki elementlerin oluşturduğu Mg<sub>2</sub>Si dışında Al<sub>12</sub>Fe<sub>3</sub>Si, Al<sub>8</sub>Fe<sub>2</sub>Si, Al<sub>15</sub>Fe<sub>3</sub>Si<sub>2</sub> veya Al<sub>5</sub>FeSi gibi intermetalik bileşiklerden oluştuğu bilinmektedir [20, 21]. Gerek T/M malzemenin ve gerekse kompozit malzemelerin matris mikroyapılarında sinterleme sebebiyle belirgin gözenek oluşumuna rastlanmamıştır. B<sub>4</sub>C takviye oranının artması ile birlikte seramik parçacıkların dağılımında kümeleşmelerin (aglomerasyon) meydana geldiği gözlenmiştir (Bkz Şekil 5c ve 5d). Bu durum sonucunda ise B<sub>4</sub>C parçacık yoğunluğunun arttığı bölgelerde yer yer parçacıklar arası mikro boşlukların varlığı belirlenmiştir. Bu durumda, Al6061+B<sub>4</sub>C tozlarının karıştırma sürecindeki parametrelerin yeterince uygun olmadığı söylenebilir. Bununla birlikte, parçacık kümeleşmesine rağmen matris-parçacık arayüzeyi oluşacak yoğunlukta matris malzemesinin B<sub>4</sub>C parçacıklarını çevrelediği görülmektedir (Şekil 5c ve 5d’de çerçeve içinde gösterilmiştir). Li ve diğerleri de (2015) Al6061/B<sub>4</sub>C ile yapmış oldukları çalışmada sıcak pres işlemi sonrası kusursuz bir matris sağlandığını ve gözenek tespit edilmediğini bildirmişlerdir [22].



**Şekil 5:** Sıcak presleme aktif sinterleme işlemi yapılan T/M ve MMK<sub>p</sub> malzemelerin mikroyapıları (Microstructures of P/M and MMC<sub>p</sub> materials with hot pressing active sintering process).

610°C’de SKSS işlemi uygulanan T/M ve MMK<sub>p</sub> malzemelere ait optik mikroskop görüntüleri Şekil 6’da verilmiştir. Burada sıvı fazın oluştuğu bölgeler kırmızı, gözenek ve/veya mikro boşluk bulunan yerler ise beyaz oklarla gösterilmiştir. Mikroyapıdan da anlaşıldığı kadarıyla sıvı faz oluşmuş bölgeler nicel olarak değerlendirildiğinde %1 civarında olduğu söylenebilir. Sinterleme sonunda T/M malzemenin fırında yavaş ve suda hızlı soğutulmasının mikroyapılardaki etkisi Şekil 6a ve 6c’de gösterilmiştir. Yavaş soğuyan 610F-T/M malzemesinde özellikle taneler arası ötektik sıvının katılaşmasıyla oluşan intermetalik

fazlar görülmektedir. 610S-T/M numunesinde ise tane sınırlarıyla birlikte tane içlerinde de intermetalik fazları içeren sıvı faz oluşumları görülmektedir. SKSS işleminde sıvı fazın oluşabileceği tane sınırları ve özellikle mikro segregasyonlar sebebiyle Mg-Si içeriği zengin ötektik sıvı içeren bölgelerdir. Zira bu alaşımda ötektik sıcaklık  $595^{\circ}\text{C}$ 'dir ve ilk sıvı oluşumu  $\text{Mg}_2\text{Si}$ 'ce zengin bölgelerde meydana gelir. Fırında soğuyan numunelerde düşük katılma hızında ötektik öncesi katı alfa ve çözeceği intermetalik bileşen ( $\text{Mg}_2\text{Si}$ ) oranı da sıcaklık azaldıkça artacaktır. Son katılan ötektik karışımca zengin sıvı olacaktır. Bu bölgelerde intermetalik fazın yoğunlaşması da mümkün olabilecektir. Bu sürecin tersine denge şartları dışında hızlı soğuma ile sağlanan katılma hızında ise, daha ince yapıli intermetalik bileşimli dentritik yapılar meydana gelmiştir [23]. Ayrıca bu numunede, çevresinde ötektik katılma formu gösteren fazla orandaki iri gözeneklerin varlığı da dikkat çekicidir. Bu oluşumların ötektik sıvının meydana getirdiği rozet tipi boşluklar olduğu söylenebilir [24, 25].

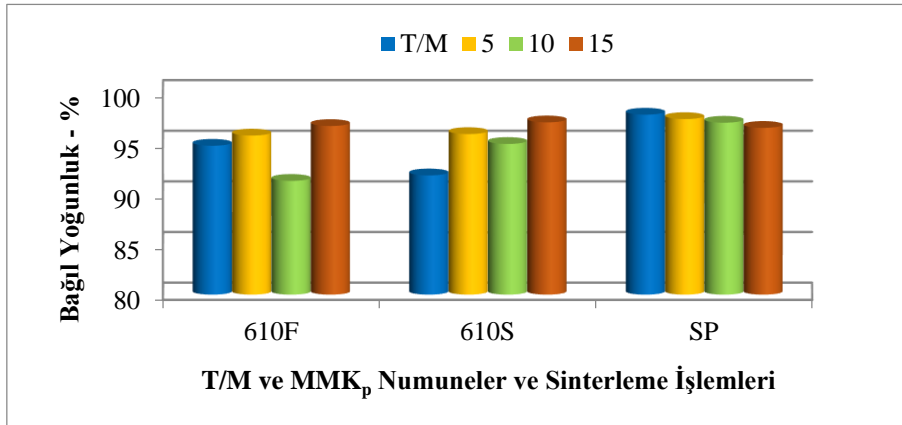


**Şekil 6:**  $610^{\circ}\text{C}$ 'de SKSS işlemi sonrası fırında (a ve b) ve suda (c ve d) soğutulan T/M ve  $\text{MMC}_p$  malzemelerin mikroyapıları (Microstructures of P/M and  $\text{MMC}_p$  materials cooled in furnace (a and b) and water (c and d) after SLPS at  $610^{\circ}\text{C}$ ).

$\text{MMC}_p$  malzemelerin mikroyapısında ise, artan takviye oranı ile birlikte parçacıklar arası mikro boşlukların da arttığı belirlenmiştir (Bkz Şekil 6b ve 6d). Ayrıca,  $\text{B}_4\text{C}$  oranındaki artışla matris tane sınırlarında belirgin oranda artan ve parçacıkların çevresinde yoğunlaşan dairesel formulu oluşumlar belirlenmiştir. Bu yapıların sıvı fazın katılma sürecinde oluşan ötektik öncesi katı alfa+intermetalik bileşim içeren karışım fazlar olduğu değerlendirilmiştir [18]. Suda hızlı soğutulan 610S/15 numunesinde belirgin azalma görülmesine rağmen belirtilen yapılar bu malzemede de mevcuttur. Artan  $\text{B}_4\text{C}$  oranıyla ve mikro boşluklarla birlikte  $\text{MMC}_p$  malzemenin ısı iletkenliğinin de düşeceği bilinmektedir. Bu sebeple,  $\text{MMC}_p$  malzemelerde artan  $\text{B}_4\text{C}$  oranıyla birlikte azalan soğuma hızının oluşan sıvı faz ve katılma sürecini etkileyebileceği göz ardı edilmemelidir.

### 3.3 T/M ve MMK<sub>p</sub> Numunelerin Yoğunluk Değişimleri (Density Changes of P/M and MMC<sub>p</sub> Samples)

SKSS işlemi uygulanan T/M ve MMK<sub>p</sub> malzemelerin, Arşimet prensibine göre ölçülen, yoğunluk değerlerinin teorik yoğunluğa oranlanmasıyla elde edilen % bağıl yoğunluk değerleri Şekil 7’de verilmiştir. Sıcak presleme yöntemi ile üretilen T/M ve MMK<sub>p</sub> malzemelerin genel olarak tümünde yüksek yoğunluk değerlerinin elde edildiği gözlenmiştir. En yüksek yüzde yoğunluk değeri %97,8 değerine sahip sıcak preslenmiş T/M (%0 B<sub>4</sub>C) numunesinde elde edilmiştir. Bu malzemeye uygulanan SKSS işlemleri ile özellikle yüzeye yakın bölgelerde yoğunlaşarak birleşmiş ve presleme doğrultusunda dik doğrultuda yayılmış gözenekler belirlenmiştir. Hacimsel genişlemeye de sebep olan bu durum, numunelerin yoğunluğunu belirgin oranda düşürmüştür. Benzer gözenek yoğunlaşması %10 B<sub>4</sub>C katkılı 610F numunesinde yüzeye yakın bir tabaka altında meydana gelmiştir. Buradaki gözenek yoğunlaşması da bölgesel hacimsel genişlemeye ve yoğunluk düşmesine sebep olmuştur (Bkz Şekil 4b). Elde edilen sonuçlara göre artan takviye oranı ile birlikte sıcak preslenen MMK<sub>p</sub> malzemelerin yoğunluk değerlerinde bir miktar azalma eğilimi görülmektedir. Bu durumun, artan takviye oranı ile birlikte kümeleşen parçacıklar arası mikro boşluklardan kaynaklandığı söylenebilir [7, 26]. SKSS işlemi uygulanan MMK<sub>p</sub> malzemelerin yoğunluk değişimlerinde belirgin anlamlı bir ilişki görülmemiştir. Bununla birlikte, SP malzemelerin tersine, artan takviye oranlarıyla birlikte MMK<sub>p</sub> malzemelerin yoğunluklarında artış eğilimi olduğu söylenebilir. En yüksek yoğunluklar %15 B<sub>4</sub>C katkılı MMK<sub>p</sub> malzemelerde görülmektedir. Bu kompozitlerin sıvı faz sinterlenmesi sonunda yoğunluklarının kısmen arttığı görülmektedir. %5 ve %10 B<sub>4</sub>C katkılı MMK<sub>p</sub> malzemelerde görülen sıvı fazın yüzeye kusma etkisi bu malzemede belirgin değildir. SP işlemi sonunda, takviye parçacık oranıyla birlikte artan parçacıklar arası mikro boşluklar sebebiyle yoğunluğu azalan bu malzemede de, SKSS işlemi sırasında oluşan sıvı fazın kapiler etkiyle bu boşluklara yayılma eğiliminin yoğunlukta artış sağladığı düşünülebilir.

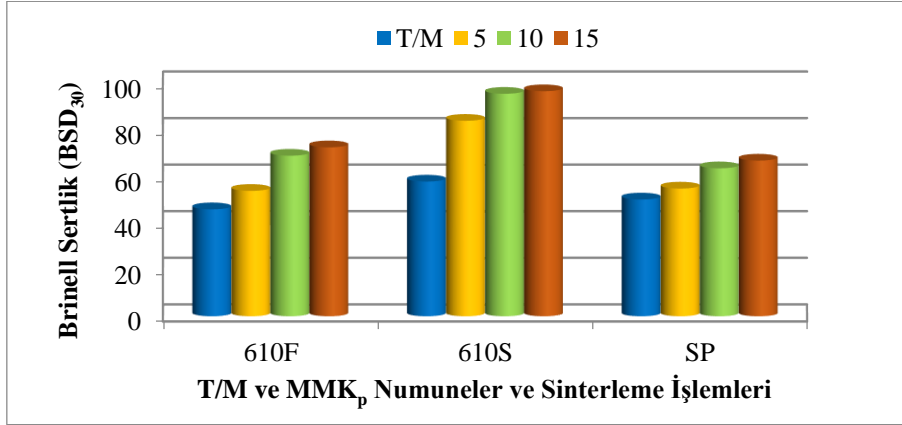


Şekil 7: Sinterleme işlemlerinin T/M ve MMK<sub>p</sub> malzemelerin yoğunluğuna etkisi (The effect of sintering processes on the density of P/M and MMC<sub>p</sub> materials).

### 3.4 T/M ve MMK<sub>p</sub> Numunelerin Sertlik Değişimleri (Hardness Changes of P/M and MMC<sub>p</sub> Samples)

T/M ve MMK<sub>p</sub> malzemelerin B<sub>4</sub>C takviye oranlarına göre sertlik değişimleri Şekil 8’de verilmiştir. Sıcak pres işlemi ile üretilen T/M ve MMK<sub>p</sub> malzemelerin Brinell Sertlik değerleri kendi aralarında incelendiğinde; en yüksek sertlik değeri %15 B<sub>4</sub>C takviye oranı içeren MMK<sub>p</sub> numunesinde 66,8 BSD<sub>30</sub> iken en düşük sertlik değerinin ise 50,1 BSD<sub>30</sub> ile T/M numunesinde olduğu gözlenmiştir. Elde edilen değerlere göre artan takviye oranı ile birlikte sıcak preslenmiş malzemelerin sertlik değerlerinde kısmi bir artış gözlenmiştir. SKSS işlemi uygulanan T/M ve MMK<sub>p</sub> malzemelerin grafik değerleri incelendiğinde; en yüksek sertlik değeri %15 B<sub>4</sub>C takviye oranına sahip 610S-15 numunesinde 96,6 BSD<sub>30</sub> iken en düşük sertlik değerinin ise 45,9 BSD<sub>30</sub> ile 610F-T/M numunesinde olduğu gözlenmiştir. 610°C’de SKSS işlemi uygulanmış ve fırında soğutulmuş T/M malzemenin sertliğinde SP numuneye göre bir miktar düşüş görülürken, %10 ve %15 B<sub>4</sub>C takviyelilerde belirgin artış gözlenmiştir. Bununla birlikte, SKSS işlemi sonrası suda soğutulan numune grubunda takviye oranı ile birlikte Brinell Sertlik değerlerinde belirgin ve

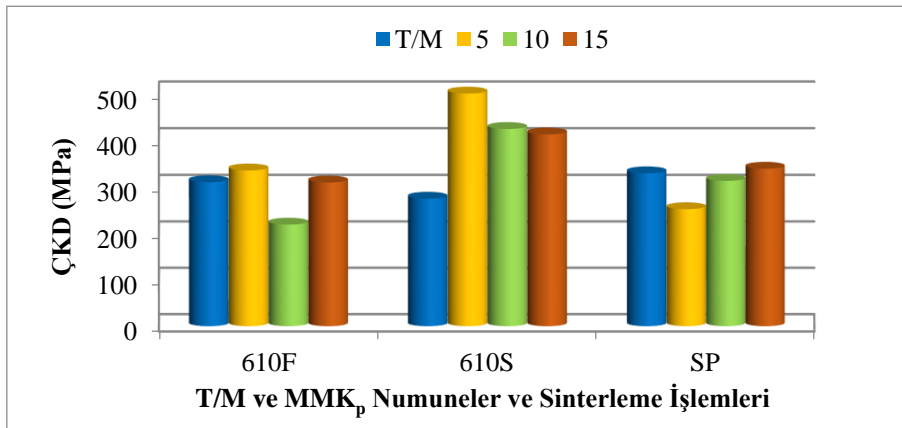
anlamalı bir artış olduğu görülmüştür. Zira bu işlemle, hem T/M malzemenin sertliğinde belirgin bir artış ve hem de B<sub>4</sub>C takviye oranının artmasıyla (özellikle %10'a kadar) sertlikte %100'e yakın artış meydana gelmiştir. Bu durumun, sıvı faz sinterleme ile sinterlenebilirliğin ve parçacık-matris arayüzey bağının artırılmasının yanında, suda hızlı soğutma ile matriste oluşturulan aşırı doymuş katı çözelti sebebiyle sağlandığı düşünülmektedir. Zira, yaşlandırma işlemlerinde hızlı soğutma ile sağlanan katı çözeltiye alma işlemi ile sağlanan sertlik artışı bilinmektedir [27, 28].



Şekil 8: T/M ve MMC<sub>p</sub> malzemelerin sertlik değerlerinin karşılaştırılması (Comparison of hardness values of P/M and MMC<sub>p</sub> materials).

### 3.5 MMC<sub>p</sub> Malzemelerin Çapraz Kırılma Dayanımlarına (ÇKD) Sinterleme İşlemlerinin Etkisi (The Effect of Sintering Processes on Transverse Rapture Strength (TRS) of MMC<sub>p</sub> Materials)

T/M ve MMC<sub>p</sub> malzemelerin takviye oranlarına bağlı olarak çapraz kırılma dayanımları Şekil 9'da verilmiştir.



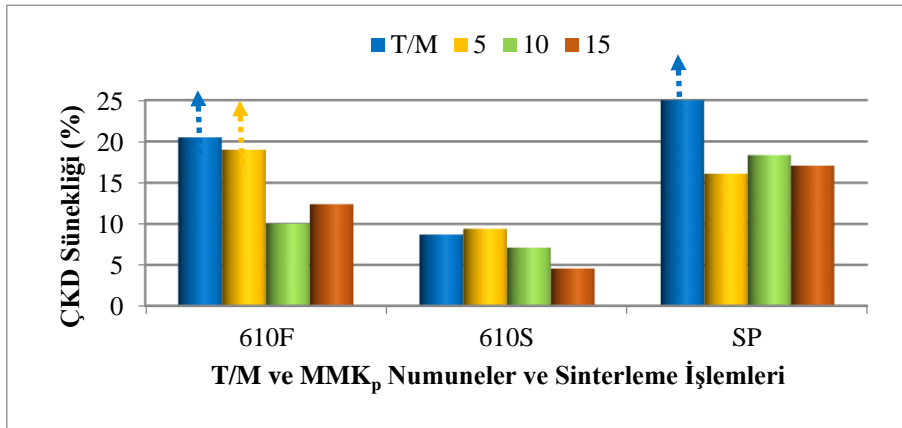
Şekil 9: T/M ve MMC<sub>p</sub> malzemelerin ÇKD değerlerinin karşılaştırılması (Comparison of TRS values of P/M and MMC<sub>p</sub> materials).

Grafik verileri genel olarak değerlendirildiğinde, SP işlemi ile üretilen malzemelerin ÇKD değerlerinin 300 MPa civarında olduğu görülmektedir. 610F işleminin genel olarak çapraz kırılma dayanımlarına belirgin etkisinin olduğu söylenemez. 610F-10 numunesinin düşük yoğunluğu ile birlikte ÇKD değerinin de düşük olması dikkat çekicidir. SP numunelere uygulanan 610S ısı işlemi ile özellikle MMC<sub>p</sub> malzemelerin ÇKD değerlerinde %100 oranına ulaşan önemli artışlar belirlenmiştir. Sıcak pres işlemi ile üretilen T/M ve MMC<sub>p</sub> malzemelerin çapraz kırılma dayanım değerleri kendi aralarında incelendiğinde; %0 B<sub>4</sub>C takviye oranına sahip T/M numunede kırılma gerçekleşmemiş olup sünek bir davranış sergilemiştir. %15 B<sub>4</sub>C takviye oranına sahip MMC<sub>p</sub>'de 339 MPa ÇKD değeri ile en yüksek, %5 B<sub>4</sub>C takviye oranına sahip MMC<sub>p</sub>'de 252 MPa ÇKD değeri ile en düşük dayanıma sahip olduğu görülmüştür. 610°C'de SKSS işlemi uygulanan T/M ve MMC<sub>p</sub> malzemelerin grafik değerleri incelendiğinde; 610S, %5

B<sub>4</sub>C takviye oranı içeren MMK<sub>p</sub> numunesinin 509 MPa ile en yüksek; 610F, %10 B<sub>4</sub>C takviye oranı içeren MMK<sub>p</sub> numunesinin 219 MPa değeri ile en düşük ÇKD değerine sahip olduğu belirlenmiştir. Li ve diğerleri (2017) yapmış oldukları çalışmada B<sub>4</sub>C partikül içeriğinin arttıkça kompozit numunesinin nihai mukavemetinin azaldığını; bu durumun artan B<sub>4</sub>C partikül içeriği ile birlikte artan B<sub>4</sub>C kümeleşmesinin (aglomerasyon) olduğunu bildirmiştir [29]. Aynı zamanda Javdani ve diğerleri de (2018) Al7075/B<sub>4</sub>C ile yapmış oldukları çalışmada mikroyapıda kümeleşmelerin varlığının gözeneklere, bu durumun ise mukavemet azalmasına neden olduğunu bildirmiştir [26]. Bu değerlendirmeler ışığında, düşük B<sub>4</sub>C oranına sahip MMK<sub>p</sub> malzemenin 610°C’de sıvı faz sinterlenmesi süreci sonunda özellikle hızlı soğutma ile sağlanan ve matrisin dayanımına katkı sağlayan aşırı doymuş katı çözeltilinin, bu malzemelerin çapraz kırılma dayanımlarını önemli oranda artırdığı söylenebilir.

### 3.6 T/M ve MMK<sub>p</sub> Malzemelerin ÇKD Sünekliği (TRS Ductility of P/M and MMC<sub>p</sub> Materials)

T/M ve MMK<sub>p</sub> malzemelerin %B<sub>4</sub>C takviye oranlarına bağlı olarak ÇKD % süneklik değerleri Şekil 10’da verilmiştir. Sıcak presleme işlemi ile üretilen malzemelerin süneklik değerleri kendi aralarında incelendiğinde; %0 B<sub>4</sub>C takviye oranına sahip SP-T/M numunesi, ÇKD deneyi sürecinde %25 oranında eğilme deformasyonuna maruz kalmasına rağmen kırılma gerçekleşmemiştir. 610°C’de SKSS işlemi uygulanan T/M ve MMK<sub>p</sub> malzemelerin grafik değerleri incelendiğinde; benzer durumun, 610F-T/M numunesi (%20,5) ve 610F-5 (%19) MMK<sub>p</sub> numuneleri için de geçerli olduğu görülmüştür. 610F-15 numunesi %12,4 süneklik değeri ile en yüksek, 610S-15 MMK<sub>p</sub> numunesi ise %4,6 ile en düşük sünekliğe sahiptir. Genel anlamda takviye oranındaki artışla birlikte kompozit malzemelerin süneklik değerlerinde azalma eğilimi gözlenmiştir. Bu duruma, matris malzemesinin sünekliğinin yanında [30], parçacık-matris arayüzeyindeki ve parçacık-parçacık arasındaki hatalardan kaynaklandığı bilinmektedir. Dolayısıyla artan takviye parçacık oranının sünekliğe olumsuz etkisi anlaşılabilir. Benzer durumu, Paidpilli ve diğerleri (2017) yapmış oldukları çalışmada beyan etmişlerdir [3]. Bununla birlikte, 610S işlemi uygulanan T/M ve MMK<sub>p</sub> malzemelerde hızlı soğutma ile sağlanan sertlik ve ÇKD değerlerindeki artışın, sünekliklerinde azalmaya sebep olduğu da söylenebilir.

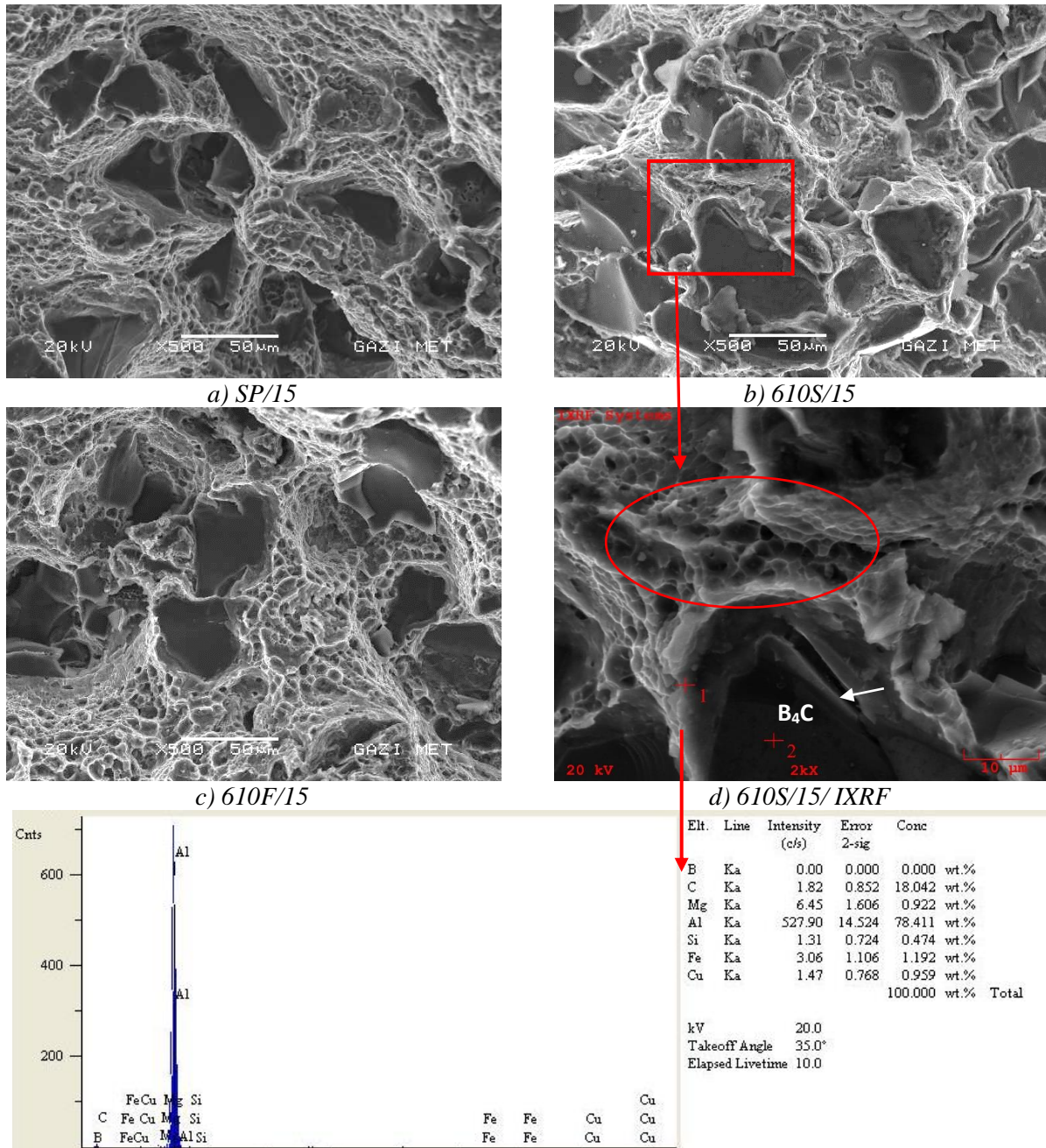


Şekil 10: T/M ve MMK<sub>p</sub> malzemelerin süneklik değerlerinin karşılaştırılması (Comparison of ductility values of P/M and MMC<sub>p</sub> materials).

### 3.7 Kırık Yüzey SEM İncelemeleri (Fracture Surface Analysis by SEM)

T/M ve MMK<sub>p</sub> malzemelerin çapraz kırılma deneyi sonrası kırık yüzeylerin SEM görüntüleri Şekil 11’de verilmiştir. Bu görüntüler, kırılan deney numunelerinin çekmeye zorlanan alt yüzeyine yakın bölgelerden alınmıştır. Dolayısıyla matrisin ÇKD deneyi sürecinde çekme etkisiyle deformasyona zorlandığı süreçteki davranışı karakterize edilebilir. Genel olarak MMK<sub>p</sub> malzemelerin SEM görüntüleri incelendiğinde; kırılma sürecinde matris malzemesinin, sünek davranış göstererek ayrıldığı gözlenmiştir [30]. Ancak bu süneklik oranı, ısıl işlem durumlarına göre farklılık göstermiştir. Şekil 11a, b ve c’de gösterilen ve kırılma sürecinde matrisin çekme uzamasıyla oluşan mikro boşlukların birleşmesiyle meydana gelen çukurcukların (çanak oluşumları) boyutlarında belirgin farklılık mevcuttur. Daha genel bir tanımlama ile 610S numunesinin matrisi ince taneli kırık yüzey formu oluşturmuşken, 610F numunesi ise çok daha

kaba kırık yüzey dokusuna sahiptir. Bu durumun, hızlı soğutma ile ve özellikle sıvı faz oluşan bölgelerde hızlı katılaşma ile sağlanan küçük taneli yapıdan kaynaklandığı söylenebilir. Zira, Şekil 11d'de gösterilen ve  $B_4C$  parçacığına komşu matrisin kırılması sürecinde oluşan çanak ağız boyutları ortalama  $5\mu m$  civarındadır. Bu bölge ile düzlemsel olarak kırılmış  $B_4C$  parçacık arasında kalan 1 nolu bölgeden alınan XRF element analiz sonuçları Şekil 11'de verilmiştir. Yoğun olarak karbon ve Si, Mg alaşım elementlerinin dışında Fe ve Cu içerikleri de belirlenmiştir. Çeşitli  $Al_{12}Fe_3Si$ ,  $Al_8Fe_2Si$  grubu ve  $CuAl_2$  gibi [20] intermetaliklerin oluşabilmesi için uygun bir kompozisyonun bulunduğu bu bölgede,  $610^\circ C$  gibi düşük sıcaklıkta Al+C reaksiyonlarının oluşabileceği mümkün gözükmemektedir [31]. Bununla birlikte, Şekil 11d'de beyaz okla gösterilen ve  $B_4C$ -Al matris arayüzeyinde oluşmuş gevrek kırılma davranışı gösteren sert fazın varlığı dikkat çekicidir.



Şekil 11: %15  $B_4C$  takviyeli  $MMC_p$  malzemelerin kırık yüzey SEM görüntüleri (SEM micrographs of 15%  $B_4C$  reinforced  $MMC_p$  materials).

#### 4. SONUÇLAR (CONCLUSION)

Sıcak presleme aktif sinterleme yöntemi ile üretilen Al6061 matrisli B<sub>4</sub>C takviyeli MMK<sub>p</sub> malzemelerin özelliklerine 610°C’de uygulanan SKSS işleminin etkisi araştırılan bu çalışmada elde edilen genel sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir;

- SKSS işlemleri ile oluşturulan sıvı fazın kapiler kuvvet etkisi ile yüzeylere doğru yayınması (kusması) sonucunda numune yüzeylerinde, katılmış küresel formda kabarcıklar meydana gelmiştir. Fırında soğutmada azalan soğutma hızı ile birlikte özellikle MMK<sub>p</sub> malzemelerin kusma oranı ve hacimsel genişleme miktarında artış gözlenmiştir
- Artan B<sub>4</sub>C takviye oranıyla birlikte, MMK<sub>p</sub> malzemelerin mikroyapısında takviye parçacıkların yer yer bölgesel kümeleşmeler (aglomerasyon) oluşturduğu ve buralarda kısmen parçacıklar arası mikro boşlukların meydana geldiği gözlenmiştir. Bununla birlikte, MMK<sub>p</sub> malzemelerde büyük oranda parçacık-matris arayüzey bağı oluşabilecek şekilde matrisin takviye parçacıkları çevrelediği belirlenmiştir.
- MMK<sub>p</sub> malzemelerin sıcak presleme veya SKSS sonrası matris mikroyapılarında, belirgin gözenek oluşumu mevcut değildir ancak, SKSS işlemi uygulanıp suda soğutulan T/M malzemenin mikroyapısında, ötektik sıvı sebepli gözenek oluşumları belirlenmiştir.
- Mikroyapı incelemelerinde, 610F-T/M numunesinde taneler arasında ötektik sıvının katılmasıyla oluşan fazlar görülürken, 610S-T/M numunesinde ise tane sınırlarıyla birlikte tane içlerinde de intermetalik fazları içeren sıvı faz oluşumları gözlenmiştir.
- Artan takviye oranı ile birlikte, kümeleşen parçacıklar arası boşluklar nedeni ile sıcak preslenen MMK<sub>p</sub> malzemelerin yoğunluk değerlerinde bir miktar azalma eğilimi görülmüştür. Ancak, bu malzemelere uygulanan SKSS işlemi ile genellikle artan takviye oranıyla birlikte yoğunluklarında da artış eğilimi belirlenmiştir.
- Artan takviye oranıyla birlikte bütün MMK<sub>p</sub> malzemelerin sertliklerinde artış eğilimi belirlenmiştir. Ancak, SKSS sinterleme işlemi uygulanan ve suda soğutulan malzemelerin sertliklerinde belirgin ve anlamlı bir artış görülmüştür.
- Benzer şekilde, SKSS sinterleme sonrası suda soğutma işlemi ile özellikle MMK<sub>p</sub> malzemelerin çapraz kırılma dayanımlarında önemli bir artış sağladığı gözlenmiştir. Bu durum düşük takviye oranındaki MMK<sub>p</sub>’lerde daha belirgindir. Artan takviye oranıyla birlikte MMK<sub>p</sub> malzemelerin ÇKD süneklikleri azalırken, suda soğutma işleminin malzemelerin sünekliklerini önemli oranda düşürdüğü görülmüştür.
- MMK<sub>p</sub> malzemelerin kırık yüzey SEM görüntüleri incelendiğinde, kırılma sürecinde matris malzemesinin sünek davranış göstererek ayrıldığı, SKSS sonrası suda soğutulan matrisin çok daha ince taneli kırık yüzey formu oluşturduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte, B<sub>4</sub>C parçacık-matris arayüzeyinde intermetalik fazların oluşturabileceği gevrek kırılma davranışı da gözlenmiştir.

#### 5. REFERANSLAR (REFERENCES)

- [1] Asgharzadeh, H., Simchi, A., Supersolidus Liquid Phase Sintering of Al6061/SiC Metal Matrix Composites. Powder Metallurgy, (52/1), (28-35), (2009).
- [2] Karakoç, H., Ovalı, İ., Dündar, S., Çıtak, R., Wear and Mechanical Properties of Al6061/SiC/B<sub>4</sub>C Hybrid Composites Produced with Powder Metallurgy, Journal of Materials Research and Technology, (8/6), (5348-5361), (2019).
- [3] Paidpilli, M., Gupta, G.K., Upadhyaya, A., Sintering Response of Aluminum 6061-TiB<sub>2</sub> Composite: Effect of Prealloyed and Premixed Matrix. Journal of Materials Engineering and Performance, (26/9), (4470-4480), (2017).



- [4] Zhang, Q., Xiao, B.L., Liu, Z.Y., Ma, Z.Y., Microstructure Evolution and Elemental Diffusion Of  $\text{SiC}_p/\text{Al-Cu-Mg}$  Composites Prepared From Elemental Powder During Hot Pressing. *J Mater Sci*, (46), (6783–6793), (2011).
- [5] Topçu, I., Gülsoy, H.O., Kadioğlu, N., Güllüoğlu, A.N., Processing and Mechanical Properties of  $\text{B}_4\text{C}$  Reinforced Al Matrix Composites. *Journal of Alloys and Compounds*, (482), (516–521), (2009).
- [6] Yıldız, T., Gür, A.K., Aba, S., Examination of the Wear Behavior of  $\text{Cu-Ni/B}_4\text{C}_p$  Composite by the Taguchi Method. *München Materials Testing*, (56), (11-12), (2014).
- [7] Gao, M., Kang, H., Chen, Z., Guo, E., Peng, P., Wang, T., Effect of Reinforcement Content and Aging Treatment on Microstructure and Mechanical Behavior of  $\text{B}_4\text{C}_p/6061\text{Al}$  Composites. *Materials Science & Engineering*, (744), (682-690), (2019).
- [8] Kumar, N., Gautam, A., Singh, R.S., Manoj, M.K., Study of  $\text{B}_4\text{C}/\text{Al-Mg-Si}$  Composites as Highly Hard and Corrosion-Resistant Materials for Industrial Applications. *Trans Indian Inst Met*, (72/9), (2495–2501), (2019).
- [9] Asghar, Z., Zahid, G.H., Din, R., Ahmad, E., Mehmood, M., Badshah, S., Effect of Degassing Parameters on Sinterability of  $\text{Al/B}_4\text{C}$  Powder Mixture. *Powder Metallurgy*, (58/1), (36-40), (2015).
- [10] Upadhyaya, G.S., (2002). *Powder Metallurgy Technology*. Published By Cambridge International Science Publishing.
- [11] Yıldız, T., Katı, N., Gür, A.K., The Effect of Sintering Temperature on Microstructure and Mechanical Properties of Alloys Produced by Using Hot Isostatic Pressing Method. *Journal of Alloys and Compounds*, (737), (8-13), (2018).
- [12] Cai, Z., Zhang, C., Wang, R., Peng, C., Wu, X., Effect of Copper Content on Microstructure and Mechanical Properties of  $\text{Al/Si}_p$  Composites Consolidated By Liquid Phase Hot Pressing. *Materials and Design*, (110), (10-17), (2016).
- [13] Padmavathi, C., Upadhyaya, A., Sintering Behaviour and Mechanical Properties of  $\text{Al-Cu-Mg-Si-Sn}$  Aluminum Alloy. *Trans Indian Inst Met*, (64:4–5), (345–357), (2011).
- [14] Gökçe, A., Fındık, F., Kurt, A.O., Sintering and Aging Behaviours of  $\text{Al}_4\text{CuXMg}$  PM Alloy. *Canadian Metallurgical Quarterly*, (55:4), (391-401), (2016).
- [15] German, R.M., (2013). *Sintering Theory And Practice* (1. Basım). Editör Gülsoy, H.Ö., Ankara: Nobel Yayınları, (374-375).
- [16] Momeni, H., Razavi, H., Shabestari, S.G., Effect of Supersolidus Liquid Phase Sintering on The Microstructure and Densification of The  $\text{Al-Cu-Mg}$  Prealloyed Powder. *Iranian Journal of Materials Science & Engineering*, (8/2), (10-17), (2010).
- [17] German, R.M., (2014). *Sintering: From Empirical Observations to Scientific Principles*, (289-291).
- [18] Padmavathi, C., Upadhyayaa, A., Agrawal, D., Effect of Microwave and Conventional Heating on Sintering Behavior and Properties of  $\text{Al-Mg-Si-Cu}$  Alloy. *Materials Chemistry and Physics* (130), (449–457), (2011).
- [19] Amado, M.N., Daroqui, F., Revision of The Solvus Limit of  $\text{Al-Mg}_2\text{Si}$  Pseudo Binary Phase Diagram. *Procedia Materials Science*, (8), (1079-1088), (2015).
- [20] Couper, M., Parson, N., *Precipitation Strengthening and Alloy Design for 6061 Al-Mg-Si Alloys. Aluminium Alloys–Their Physical and Mechanical Properties* 1 Wiley-VCH GmbH & Co, (2008).

- [21] Tomiczek, B., Pawlyta, M., Adamiak, M., Dobrzański, L.A., Effect Of Milling Time On Microstructure Of AA6061 Composites Fabricated Via Mechanical Alloying. Archives of Metallurgy and Materials, (60/2), (789-793), (2015).
- [22] Li, Y.Z., Wang, Q.Z., Wang, W.G., Xiao, B.L., Ma, Z.Y., Interfacial Reaction Mechanism Between Matrix and Reinforcement in B<sub>4</sub>C/6061Al Composites. Materials Chemistry and Physics, (154), (107-117), (2015).
- [23] Ferdian, D., Thebault, Y., Freulon, A., Lacaze, J., Characterisation Of Rosette Formation In An Aluminium–Silicon Alloy. International Journal of Cast Metals Research, (28/5), (290-294), (2015).
- [24] Anyalebechi, P.N., Hogarth, J., Effect Of Supereutectic Homogenization Incidence Of Porosity In Aluminum Alloy On 2014 Ingot. Metallurgical And Materials Transactions B, (25B), (111-122), (1994).
- [25] MacKenzie, D.S., Heat Treating Aluminum for Aerospace Applications. Houghton International, Inc. Valley Forge, PA.
- [26] Javdani, A., Daei-Sorkhabi, A.H., Microstructural and Mechanical Behavior of Blended Powder Semisolid Formed Al7075/B<sub>4</sub>C Composites Under Different Experimental Conditions. Trans. Nonferrous Met. Soc. China (28), (1298–1310), (2018).
- [27] Liu, S., Zhou, Z., Li, D., Guo, S., Shu, S., Effect of Pack Rolling and Heat Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of B<sub>4</sub>C<sub>p</sub>/6061Al Composite Prepared by Powder Metallurgy. Metals and Materials International, (2019)
- [28] Rajasekaran, S., Udayashankar, N.K., Nayak, J., T4 and T6 Treatment of 6061 Al-15 Vol. % SiC<sub>p</sub> Composite. ISRN Materials Science, (2012/374719), (1-5), (2011).
- [29] Li, Y., Wang, W., Zhou, J., Chen, H., Zhang, P., 10B Areal Density: a Novel Approach for Design and Fabrication of B<sub>4</sub>C/6061Al Neutron Absorbing Materials. Journal of Nuclear Materials, (487), (238-246), (2017).
- [30] Ekici, E., Özçatalbaş, Y., Gülesin, M., Mechanical and Fracture Behavior of B<sub>4</sub>C Reinforced Al Composites Produced By Hot Pressing. München Materials Testing, (58-2), (133-139), (2016).
- [31] National Research Council (U.S.), (2011). Opportunities in Protection Materials Science and Technology for Future Army Applications. National Academies Press, (pp:146).

## Direct Active-Reactive Power Control of Three Phase PWM Rectifier

 Harun ÖZBAY<sup>1,\*</sup> Akif KARAFİL<sup>2</sup>
<sup>1</sup>Bandırma Onyedli Eylül University, Faculty of Engineering and Natural Science, Department of Electrical Engineering, 10200, Bandırma/BALIKESİR

<sup>2</sup>Yalova University, Faculty of Engineering, Department of Electrical-Electronics Engineering, 77200, Merkez/Yalova

### Graphical/Tabular Abstract

#### Article Info:

Research article

Received: 10/05/2020

Revision: 11/06/2020

Accepted: 03/07/2020

#### Highlights

- AC/DC converter
- Embedded Code
- DSP

#### Keywords

 Direct Power Control  
 Active-Reactive Power  
 Control  
 Three-Phase PWM  
 Rectifier  
 Enhanced PLL

In this study, an algorithm was developed for direct power control of PWM rectifier using PI controller. In this way, the active power quality transferred to the load was increased by precisely adjusting the DC voltage on the load. In addition, reactive power support was provided according to the requirement of the grid.

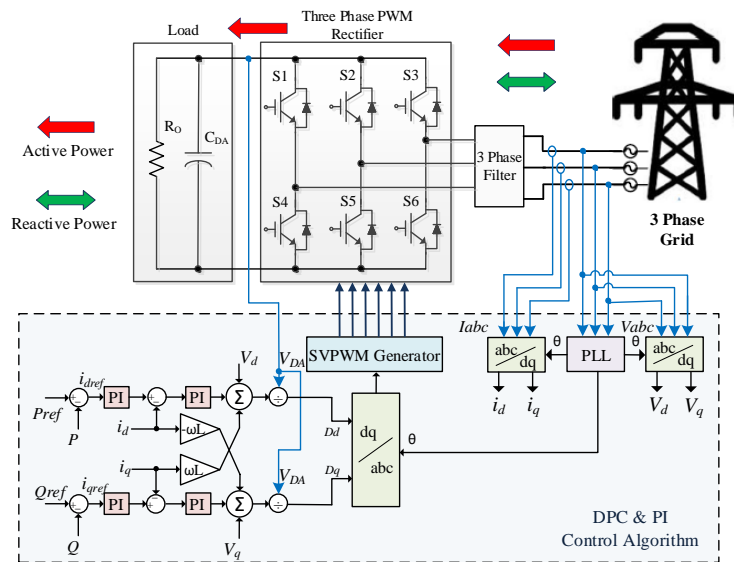


Figure A. Block diagram of three phase PWM rectifier and control

**Purpose:** In this study, simulation and experimental studies of direct power control for three phase pulse width modulation (PWM) rectifier circuit application are presented. Firstly, PWM rectifier was designed and simulated. Then, a prototype was designed to transfer 1 kVA of power to verify the developed algorithms.

**Theory and Methods:** PWM rectifier and direct power control design were explained step by step. Simulation studies were conducted using PSIM program, all control algorithms were written in block C and embedded code was produced by the program. The performance of simulation and experimental studies conducted for the developed direct power transfer algorithm was proved.

**Results:** Power transfer up to 1 kVA was achieved in compliance with the design limits. In addition, capacitive power transfer to the grid was provided with -600 VAR reactive power support. By ensuring that the total harmonic distortion of the currents drawn from the grid was below 5%, power transfer was realized in accordance with the standards.

**Conclusion:** In this study, simulation and experimental results of active and reactive power control of three phase PWM rectifier were obtained. Direct power transfer calculations were performed by converting from the three-phase system required for the system to the dq plane, and tests were carried out at different active-reactive power values. TMS320F28335 DSP was used to control the system.

GU J Sci, Part C, 8(3): 616-631 (2020)



Gazi Üniversitesi

**Fen Bilimleri Dergisi**  
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ


<http://dergipark.gov.tr/gujsc>

## Üç Fazlı DGM Doğrultucunun Doğrudan Aktif-Reaktif Güç Kontrolü

Harun ÖZBAY<sup>1,\*</sup> Akif KARAFİL<sup>2</sup><sup>1</sup>Bandırma Onyedü Eylül Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, 10200, Bandırma/BALIKESİR<sup>2</sup>Yalova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 77200, Merkez/Yalova

### Öz

Bu çalışmada, üç fazlı darbe genişlik modülasyonlu doğrultucu devre uygulaması için doğrudan güç kontrolünün benzetim ve deneysel uygulaması sunulmuştur. Darbe genişlik modülasyonlu doğrultucu devrelerinin, diyotlu doğrultucu devrelerine göre en önemli avantajları DA geriliminin ve güç faktörünün ayarlanabilir olmasıdır. Böylece şebekeden çekilen akımların harmonik seviyesi uluslararası standartlar içinde tutulabilmektedir. Bu çalışmada, PI denetleyici kullanılarak darbe genişlik modülasyonlu doğrultucunun doğrudan güç kontrolünün yapılabilmesi için bir algoritma geliştirilmiştir. Bu sayede yük üzerindeki DA gerilimi hassas bir şekilde ayarlanarak yüke aktarılan aktif güç kalitesi artırılmıştır. Ayrıca şebekenin gereksinim durumuna göre reaktif güç desteği de sağlanabilmektedir. Böylece geliştirilen doğrudan güç aktarım algoritmasının benzetim ve deneysel çalışmalarına ilişkin başarıları kanıtlanmıştır. Benzetim çalışmaları PSIM programı ile yapılarak tüm kontrol algoritmaları C bloğunda yazılmış ve program tarafından gömülü kod üretilmiştir. Geliştirilen algoritmaların doğrulanması için 1 kVA güç aktaracak şekilde bir prototip tasarlanmıştır.

### Makale Bilgisi

Araştırma makalesi  
Başvuru: 10/05/2020  
Düzeltilme: 11/06/2020  
Kabul: 03/07/2020

### Anahtar Kelimeler

Doğrudan Güç Kontrolü  
Aktif-Reaktif Güç Kontrolü  
Üç Fazlı PWM  
Doğrultucu  
Gelişmiş FKD

## Direct Active-Reactive Power Control of Three Phase PWM Rectifier

### Keywords

Direct Power Control  
Active-Reactive Power  
Control  
Three-Phase PWM  
Rectifier  
Enhanced PLL

### Abstract

In this study, simulation and experimental studies of direct power control for three phase pulse width modulation (PWM) rectifier circuit application are presented. The main advantage of PWM rectifier circuits over diode rectifier circuits is that the DC voltage and power factor are adjustable. Thus, the harmonic level of currents drawn from the grid can be kept within international standards. In this study, an algorithm was developed for direct power control of PWM rectifier using PI controller. In this way, the active power quality transferred to the load was increased by precisely adjusting the DC voltage on the load. In addition, reactive power support was provided according to the requirement of the grid. Thus, the performance of simulation and experimental studies conducted for the developed direct power transfer algorithm has been proved. Simulation studies were conducted using PSIM program, all control algorithms were written in block C and embedded code was produced by the program. A prototype was designed to transfer 1 kVA of power to verify the developed algorithms.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Üç fazlı darbe genişlik modülasyonlu (DGM) doğrultucular, AA'dan DA'ya dönüşüm gerektiren uygulamalarda sıklıkla kullanılmaktadır. Ayrıca, IEEE-519, IEC61000-3-2 ve 61000-3-4 gibi güç kalitesi standartlarına uymak için en uygun yöntemlerden biri de üç fazlı DGM doğrultucunun kullanılmasıdır. Birçok uygulamada bu standartların uygunluğu oldukça sıkı kontrol edilmektedir. Uygulamalar arasında elektrikli araçlar için yüksek verimli batarya şarj sistemi [1], elektrikli hava taşıtları için değişken frekanslı doğrultma sistemi [2], rüzgâr türbinleri için uygun maliyetli doğrultucu sistemleri [3], elektrikli trenler için geri kazanımlı fren sistemi [4], şebekeye entegre batarya enerji depolama sistemleri [5] yüksek emniyetli kesintisiz güç kaynağı [6] ve güç kat sayısı düzeltme devreleri [7] yer almaktadır. Bu uygulamalarda üç fazlı DGM doğrultucu ile şebeke tarafındaki alternatif akım, kontrollü bir şekilde doğrultularak uygun bir DA gerilim seviyesinde güç kontrolü gerçekleştirilmektedir. Ayrıca şebeke akımı

ve gerilimi arasındaki faz farkının da ayarlanabilmesi sağlanmaktadır. Anahtarlama frekansı genellikle 2 kHz ile 15 kHz arasında tasarlanmaktadır. Anahtarlama frekansının yüksek seçilmesi şebeke tarafında oluşan elektromanyetik girişimi arttırarak duyarlı yükleri bozabilecek yüksek dereceli harmoniklere neden olmaktadır. Şebeke tarafında uygun değerde bir bobin kullanılarak bu sorun çözülebilmektedir [8,9].

Üç fazlı DGM doğrultucular için son yıllarda çeşitli kontrol teknikleri önerilmiştir. Bu teknikler arasında, dâhili akım kontrol döngüsü aracılığıyla dinamik performans sağlayan gerilim merkezli kontrol (GMK) tekniği oldukça sık kullanılmaktadır [10]. Fakat bu teknikte performans, seçilen akım kontrol stratejisinin kalitesine bağlıdır [11]. Ayrıca, literatürde oransal integral (PI) [12], model öngörülü [13], bulanık mantık [14] ve tekrarlamalı [15] gibi kontrol teknikleri de yer almaktadır. Doğrudan güç kontrolü (DGK) olarak bilinen teknik ise aktif ve reaktif gücün doğrudan kontrolüne dayanmaktadır. Doğrudan güç kontrolünde genellikle uygun anahtarlama tablosu kullanılmaktadır [16]. Doğrudan güç kontrolünde kontrol edilemeyen periyodik anahtarlama sinyalleri büyük bir dezavantaj oluşturmaktadır. Bu dezavantajları gidermek için literatürde diğer DGK yapıları önerilmiştir [17].

Üç fazlı DGM doğrultucu devrelerinde şebeke ile senkronizasyonun sağlanabilmesi için faz kilitleme döngüsünün (FKD) kullanılması gerekir [18,19]. FKD algoritması ile sistem frekansının veya şebeke frekansının kontrolü sağlanmaktadır [20, 21]. Özellikle dengesiz şebekelerde DGM doğrultucusunun kontrolü oldukça zordur. Bu sorunların çözümü için uygun bir FKD algoritmasının kullanılması gerekir. Geleneksel FKD teknikleri sadece ideal ve simetrik üç fazlı şebekelerde güvenli bir şekilde çalışmaktadır [22]. Dolayısıyla frekans dalgalanmalarında, asimetrik gerilim değerlerinde ve harmonikli şebekelerde oldukça kararlı çalışan gelişmiş bir FKD algoritmasına ihtiyaç vardır [23].

Bu çalışmada, doğrudan güç kontrolü yapılabilen üç fazlı DGM doğrultma devresinin analizi yapılarak benzetim ve deneysel sonuçlar elde edilmiştir. Çalışmanın bölümleri şu şekilde düzenlenmiştir: Giriş Bölümü'nden sonra DGM doğrultucu tasarımı ve FKD yapısı anlatılmıştır. Bir sonraki bölümde doğrudan güç kontrolü ve PI akım kontrol yöntemlerinden bahsedilmiştir. Daha sonra sistemin benzetim ve deneysel sonuçlarına yer verilmiştir. Sonuç kısmında ise elde edilen benzetim ve deneysel sonuçlar yorumlanmıştır.

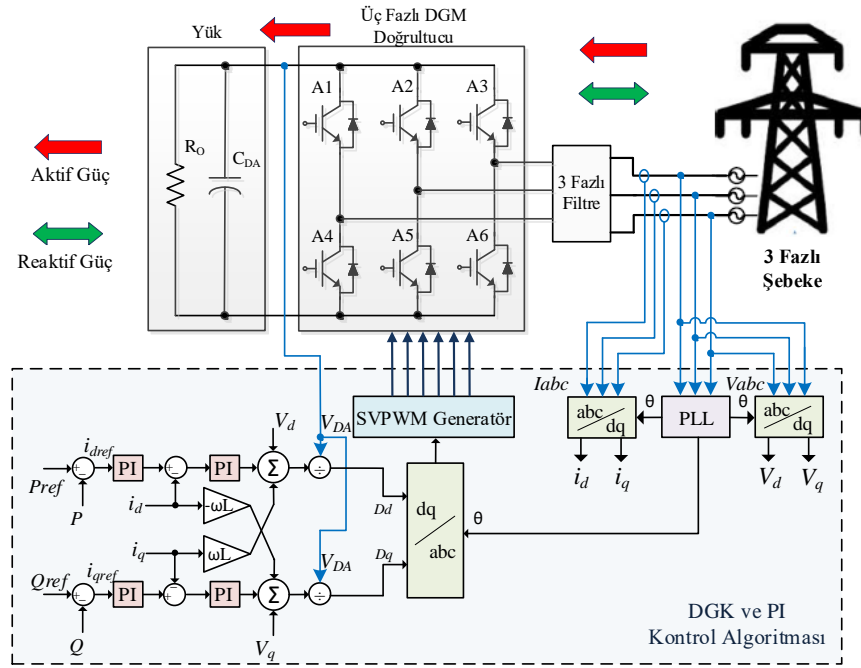
## 2. ÜÇ FAZLI DGM DOĞRULTUCU TASARIMI (DESIGN OF THREE PHASE PWM RECTIFIER)

Üç fazlı DGM doğrultucu yapısı ve kontrol blok şeması Şekil 1'de verilmiştir. Üç fazlı DGM kontrol sistemi ile yük akımı, gerilimi ve gücüne ait değişkenler kontrol edilebilir. Bu değişkenlerin kontrolü için birçok denetleyici kullanılmaktadır. Bunlar; doğrusal, doğrusal olmayan, dayanıklı, öngörülü ve akıllı denetleyicilerdir. Doğrusal denetleyiciler dışındaki denetleyiciler iyi bir dinamik tepki göstermelerine rağmen sistem içinde bir zaman gecikmesi meydana getirirler. Bu yüzden genellikle doğrusal denetleyiciler tercih edilir [24]. Bu çalışmada da en yaygın kullanılan doğrusal denetleyicilerden biri olan PI denetleyici kullanılmıştır.

### 2.1. Üç Fazlı DGM Doğrultucuda Anahtarlama Durumları (Switching Cases in Three Phase PWM Rectifier)

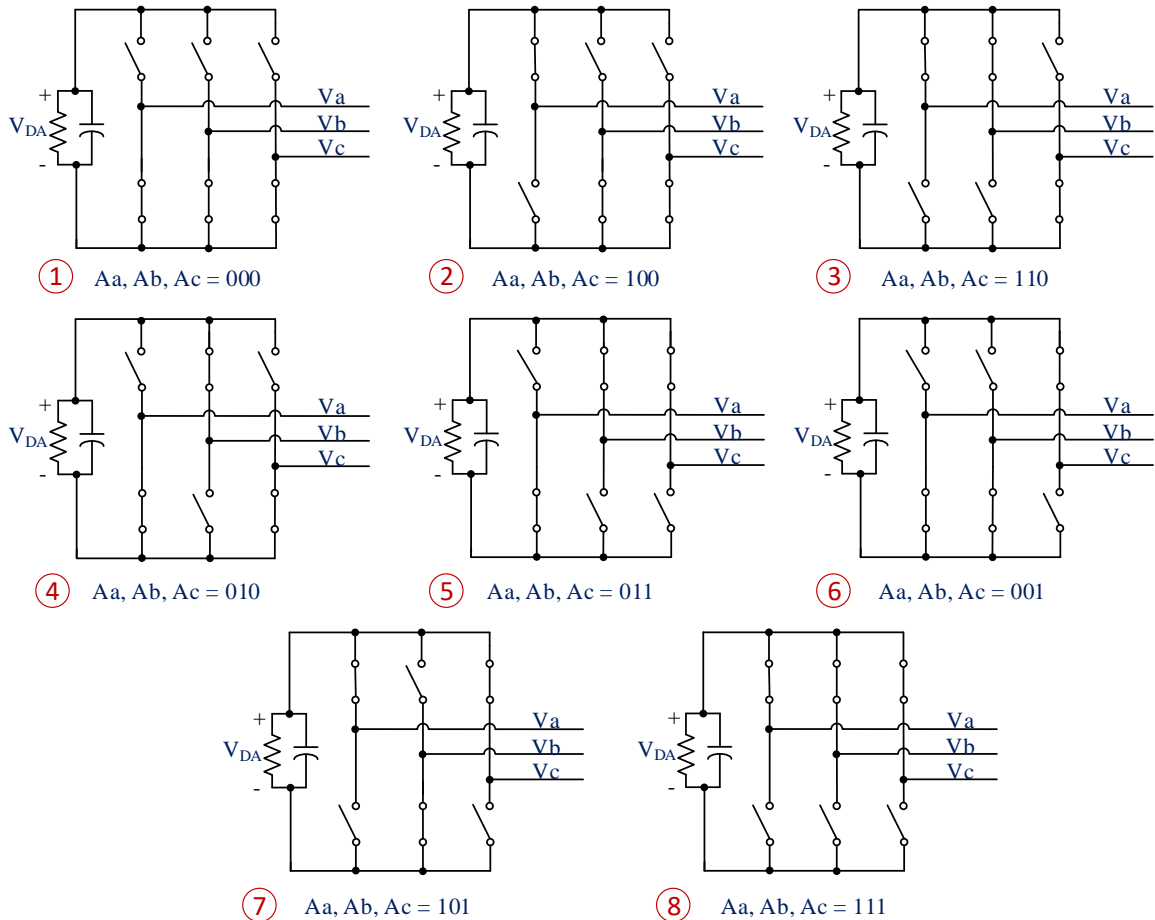
Üç fazlı DGM doğrultucunun anahtarlama durumları Şekil 2'de gösterilmiştir. Aa, Ab ve Ac anahtarlama durumlarını ifade etmektedir. Üç fazlı DGM doğrultucu giriş gerilimleri, DA bara gerilimi ve anahtarlama durumlarına göre Denklem 1'deki matris ile hesaplanmaktadır.

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} V_{DA} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_a \\ A_b \\ A_c \end{bmatrix} \quad 1$$



Şekil 1. Üç fazlı DGM doğrultucunun yapısı ve kontrol blok şeması

$A_a$ 'nın 1 olması üstteki anahtarın iletimde olduğunu,  $A_a$ 'nın 0 olması ise alttaki anahtarın iletimde olduğunu göstermektedir. Üç fazlı DGM doğrultucuda alt ve üst anahtarların iletimde ve yalıtımda olmasına göre sekiz farklı durum oluşmaktadır.



Şekil 2. Üç fazlı DGM doğrultucunun anahtarlama durumları

Anahtarlama durumları ve şebeke faz gerilimlerine bağlı olarak  $V_{DA}$  gerilim durumları Tablo 1’de verilmektedir. İstenilen çıkış geriliminin elde edilebilmesi için DGM doğrultucunun anahtarlama durumları arasında geçiş yapılmaktadır. İstenilen DGM doğrultucu çıkış gerilimi uygun modülasyon teknikleri ile sağlanmaktadır [25].

**Tablo 1.** Üç fazlı DGM doğrultucu için anahtarlama tablosu

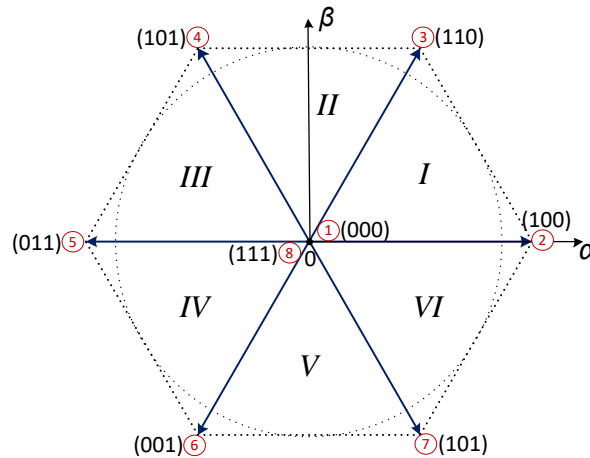
Durum	Anahtarlama Durumları			$V_{DA}$
	$A_a$	$A_b$	$A_c$	
1	0	0	0	0
2	1	0	0	$V_{ab} - V_{ca}$
3	1	1	0	$V_{bc} - V_{ca}$
4	0	1	0	$V_{bc} - V_{ab}$
5	0	1	1	$V_{ca} - V_{ab}$
6	0	0	1	$V_{ca} - V_{bc}$
7	1	0	1	$V_{ab} - V_{bc}$
8	1	1	1	0

DGM tekniği ile güç anahtarlarının uygun şekilde anahtarlanarak istenilen çıkış geriliminin elde edilmesi sağlanmaktadır. Uygulamalarda en sık kullanılan DGM teknikleri aşağıdaki şekilde sınıflandırılmaktadır [26].

- ✓ Sinüzoidal DGM
- ✓ Histerezis Akım Kontrollü DGM
- ✓ Uzay vektör DGM (SVPWM)

Histerezis akım kontrol DGM ve sinüzoidal DGM teknikleri analog yöntemler kullanılarak gerçekleştirilebilmektedir. Uzay vektör DGM tekniğinde ise yüksek frekanslarda anahtarlama sinyallerinin oluşturulması ve bazı matematiksel işlemlerin hızlı yapılabilmesi için gelişmiş bir mikroişlemci kullanımına ihtiyaç duyulmaktadır.

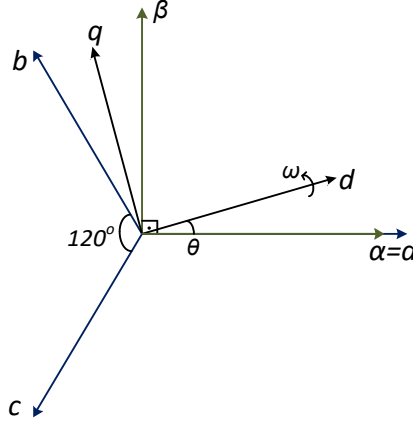
Üç fazlı DGM doğrultucularında, SVPWM kontrol tekniği kullanılmasıyla, diğer yöntemlere göre daha düşük harmonikler üretilmektedir [26]. Üç fazlı DGM doğrultucu kontrolünde kullanılan SVPWM kontrol tekniğinde Clarke ve Park dönüşümleri gibi bazı matematiksel hesaplamalar gerekmektedir. Bu hesaplama sonuçları kartezyen düzleme aktarıldığında Şekil 3’te görülen hexagon adı verilen altı adet sektörden oluşan uzay vektörleri elde edilir. Şekildeki altı adet vektör kullanılarak ana vektörler arasında kalan diğer sonsuz sayıdaki vektörler de elde edilebilmektedir.



**Şekil 3.** SVPWM tekniğinde üretilen uzay vektörleri

## 2.2. Park ve Clarke Dönüşümleri (Park and Clarke Transformations)

SVPWM tekniğinde Clarke dönüşümü ile aralarında  $120^\circ$  faz farkı olan üç fazlı büyüklükler, sabit bir ekseninde veya senkron olarak dönen bir ekseninde iki faz büyüklüklerine dönüştürülür [27]. Böylece üç faz çıkış akımlarından  $\alpha$  ve  $\beta$  eksenine geçilmiş olur.  $\alpha$  ve  $\beta$  ekseninden  $\theta$  açısı kadar açısal fark olan d ve q sistemine Park dönüşümü ile geçiş sağlanır. Üç fazlı sistemden  $\alpha\beta$  ve dq sistemine geçiş Şekil 4'te görülmektedir.



Şekil 4. Üç fazlı sistemden  $\alpha$ - $\beta$  ve d-q sistemine geçiş

Üç faz eksen düzleminde  $\alpha$  ve  $\beta$  eksenine dönüşüm Denklem 2 kullanılarak elde edilir;

$$\begin{aligned} i_\alpha &= \frac{2}{3}i_a - \frac{1}{3}(i_b - i_c) \\ i_\beta &= \frac{2}{\sqrt{3}}(i_b - i_c) \\ i_0 &= \frac{2}{3}(i_a + i_b + i_c) \end{aligned} \quad 2$$

Buradaki denklemler düzenlenerek Denklem 3 elde edilir.

$$\begin{aligned} i_\alpha &= i_a \\ i_\beta &= \frac{1}{\sqrt{3}}i_a + \frac{2}{\sqrt{3}}i_b \\ i_a + i_b + i_c &= 0 \end{aligned} \quad 3$$

Park dönüşümü ile  $\alpha$ - $\beta$  ekseninden aralarında  $\theta$  açısı kadar fark olan d-q eksenine geçiş Denklem 4 ile gerçekleştirilir;

$$\begin{aligned} i_d &= i_\alpha \cos(\theta) + i_\beta \sin(\theta) \\ i_q &= -i_\alpha \sin(\theta) + i_\beta \cos(\theta) \end{aligned} \quad 4$$

Denklem 5 kullanılarak d-q ekseninden  $\alpha$ - $\beta$  eksenine geçilir.

$$\begin{aligned} i_\alpha &= i_d \cos(\theta) - i_q \sin(\theta) \\ i_\beta &= i_d \sin(\theta) + i_q \cos(\theta) \end{aligned} \quad 5$$



Bu denklemler faz akımları cinsinden verilmiştir. Faz gerilimleri için de aynı denklemler kullanılmaktadır. Buna göre üç faz düzleminde  $\alpha$ - $\beta$  eksenine geçiş denklemlerinin matris haline dönüştürülmüş ve faz gerilimleri cinsinden verilmiş hali Denklem 6'daki gibidir:

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (6)$$

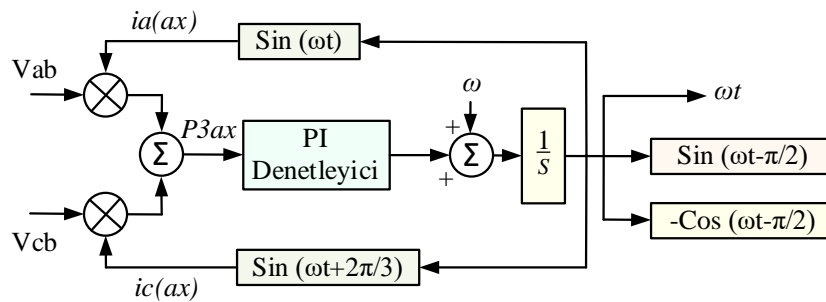
Üç faz düzleminde  $d$ - $q$  eksenine geçiş denklemlerinin matris haline dönüştürülmüş hali Denklem 7'de verilmektedir;

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin \theta & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (7)$$

Elde edilen temel denklemler kullanılarak şebeke akımı ve sabit bir  $\alpha$ - $\beta$  ile  $d$ - $q$  referans çerçevesinde şebeke gerilimi elde edilir ve uzay vektörünün konumunu elde etmek için ise FKD algoritması kullanılmaktadır.

### 2.3. Gelişmiş FKD Tasarımı ve Doğrudan Güç Kontrolü (Enhanced PLL Design and Direct Power Control)

Geleneksel FKD algoritmaları, yüksek oranda bozulmuş ve dengesiz sistem gerilimleri için düşük performans gösterir. Bu yüzden bu tür sistemlerde gelişmiş FKD algoritması kullanılarak yüksek performans elde edilebilir. Gelişmiş FKD diyagramı Şekil 5'te gösterilmiştir. Gelişmiş FKD'de ölçülen doğrusal gerilimler, geri besleme akımları ile çarpılır ve aralarında  $120^\circ$  faz farkı olan iki sinyal elde edilir. Çıkışı kararlı hale getirebilmek için referans temel açısal frekans ( $\omega_0 = 2\pi f$ ) PI denetleyicisinin çıkışına eklenir. Açısal hız ( $\omega t$ ), PI denetleyicisinden sonra integralin çıkışı ile elde edilmektedir. Ancak üretilen  $\omega_0$ ,  $90^\circ$  ileri fazlı olarak üretilir. Bu nedenle, sistem temel frekansına ulaşmak için integratörün çıkışına  $-\pi/2$  eklenir. Böylece gelişmiş FKD algoritması, üç fazlı anlık aktif güç ( $P_{3ax}$ ) sıfır olduğunda kararlı bir çalışma noktasına gelerek şebeke frekansına kilitlemiş olur [28, 29].



Şekil 5. Gelişmiş FKD algoritması

Tasarlanan gelişmiş FKD algoritması ile şebekeyle senkronize olan açısal hız değerleri üretilmiştir. Ayrıca dönüşüm sonucunda iki faz bilgisi kullanılarak aktif ve reaktif güç hesaplamaları da Denklem 8'deki gibi basitçe yapılmaktadır.

$$P = \frac{3}{2} (v_d \times i_d + v_q \times i_q) \quad (8)$$

$$Q = \frac{3}{2} (v_q \times i_d - v_d \times i_q)$$

Şebekeden yüke aktarılacak aktif gücün referans komutu ( $P_{ref}$ ) olarak belirlenmektedir. Denetleyiciye gönderilen aktif ve reaktif güç komutları ( $P_{ref}$ ,  $Q_{ref}$ ) iç içe iki PI döngüsü kullanılarak istenilen güç değeri elde edilir ve bu güç değeri şebekeden yüke aktarılır. Denklem 9 ile aktif ve reaktif akım komutları üretilmektedir;

$$i_{dref} = K_{Pd} \times (P_{ref} - P) + \frac{K_{Id}}{s} \times (P_{ref} - P) \quad (9)$$

$$i_{qref} = K_{Pq} \times (Q_{ref} - Q) + \frac{K_{Iq}}{s} \times (Q_{ref} - Q)$$

Burada;  $K_{Pd}$  ve  $K_{Id}$ ,  $i_{dref}$  akımı için PI denetleyicisinin katsayılarını ifade etmektedir.  $K_{Pq}$  ve  $K_{Iq}$  ise  $i_{qref}$  akımının PI denetleyicisinin katsayılarını ifade etmektedir. Ayrıca anahtarların görev oranı (D) durumları Denklem 10'da verilmektedir.

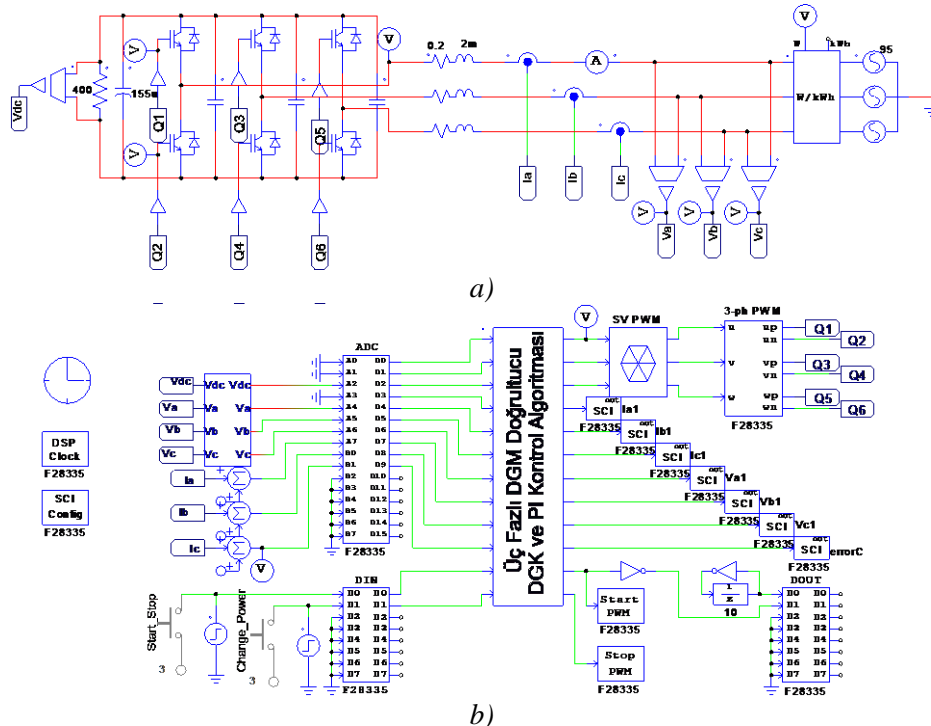
$$D_d = \left( \left( K_{Pd1} \times (i_{dref} - i_d) + \frac{K_{Id1}}{s} \times (i_{dref} - i_d) \right) + (i_q \times \omega L) + V_d \right) / V_{DA} \quad (10)$$

$$D_q = \left( \left( K_{Pq1} \times (i_{qref} - i_q) + \frac{K_{Iq1}}{s} \times (i_{qref} - i_q) \right) - (i_d \times \omega L) + V_q \right) / V_{DA}$$

Burada;  $K_{Pd1}$  ve  $K_{Id1}$ , görev oranı  $D_d$  için PI denetleyicisinin katsayılarını ifade etmektedir.  $K_{Pq1}$  ve  $K_{Iq1}$  ise görev oranı  $D_q$  için PI denetleyicisinin katsayılarını ifade etmektedir. Daha sonra, ters dönüşüm matrisi kullanılarak abc düzleminde anahtarların görev oranı belirlenerek, SVPWM yöntemi ile güç anahtarlarına uygun anahtarlama sinyalleri gönderilmektedir.

### 3. PSIM İLE ÜÇ FAZLI DGM DOĞRULTUCU BENZETİM SONUÇLARI (THREE PHASE PWM RECTIFIER SIMULATION RESULTS WITH PSIM)

Tasarlanan üç fazlı DGM doğrultucu sisteminin benzetim çalışmaları PSIM programı ile yapılmıştır. Benzetim çalışmasında bütün denetleyiciler C kodları ile yazılmış ve DSP için gömülü kod üretilecek şekilde tasarlanmıştır. Sistemin PSIM ile benzetim şeması Şekil 6'da gösterilmektedir.



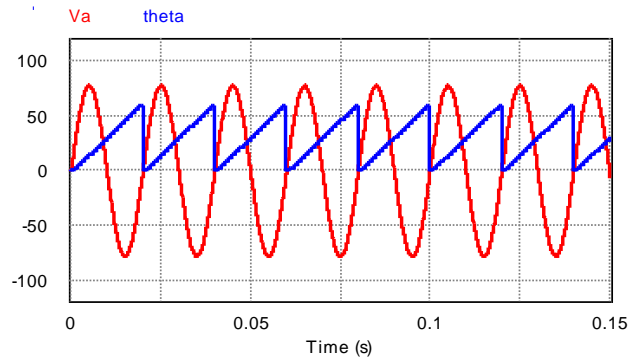
Şekil 6. Tasarlanan üç fazlı DGM doğrultucunun PSIM devre şeması a) Güç devresi b) Kontrol devresi

Tablo2’de hem benzetimde hem uygulamada kullanılan devreye ait değerler verilmiştir.

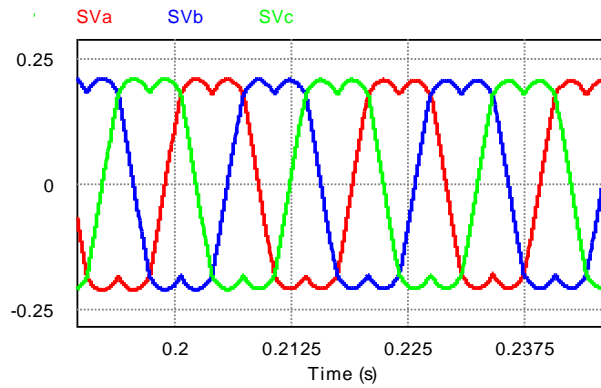
**Tablo 2.** Doğrultucu devresine ait değişkenlerin değerleri

<b>Değişkenler</b>	<b>Değerleri</b>
Şebeke Gerilimi ( $V_{ff}$ )	95 V
Maksimum Çıkış Gücü ( $P_m$ )	1 kW
Maksimum DA Gerilimi ( $V_{DA}$ )	500 V
Şebeke Frekansı ( $f$ )	50 Hz
Hat Filtresi	2 mH
DA Kondansatörü	155 $\mu$ F
Anahtarlama Frekansı ( $f_a$ )	10 kHz

Üç fazlı DGM doğrultucunun doğrudan güç kontrollü olarak çalıştırılabilmesi için öncelikle FKD yapılmalıdır. Böylece her periyot için açılma hız değerleri üretilmektedir. Bu değerler, üç fazlı DGM doğrultucuda anahtarlama sırası ve faz açısı ayarı için gereklidir. Şekil 7’de FKD algoritmasının A fazına kilitlenerek açılma hız değerlerinin üretimi görülmektedir. Şekil 8’de ise uzay vektör DGM (SPWM) çıkış sinyalleri verilmiştir.



**Şekil 7.** FKD ile açılma hız değerlerinin üretimi



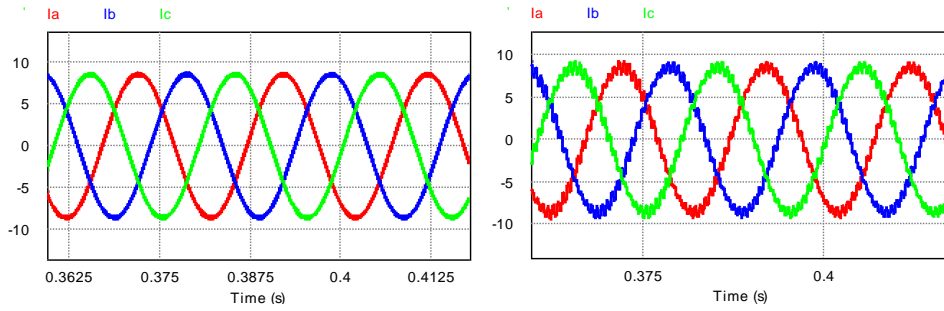
**Şekil 8.** Uzay vektör DGM çıkış sinyalleri

Geliştirilen kontrol stratejisine göre farklı güç senaryolarında benzetim çalışmaları yapılmıştır. Sistem, referans P ve Q gücüne göre PI denetleyici ile referans akım değerlerini ayarlar ve sonuçlara göre tekrar PI denetleyici ile anahtarlama durumlarını belirler. Benzetim ve deneysel çalışmalarından önce en uygun PI değerleri bulunarak denemeler yapılmıştır. Tablo 3’te benzetim ve uygulama çalışmalarında kullanılan farklı PI değerleri verilmiştir. Tablo 3’teki Değer 1 şeklinde belirtilen kısım toplam harmonik bozulma (THD) değerlerinin en az bulunabilmesi için tespit edilmiş en uygun değerlerdir.

**Tablo 3.** PI denetleyicilerin parametre değerleri

Parametreler	Değer1	Değer2
FKD algoritmasındaki PI denetleyici için oransal ( $K_p$ )	60	60
FKD algoritmasındaki PI denetleyici için integral ( $K_i$ )	0,6	0,6
Güç kontrolündeki PI denetleyici için oransal ( $K_p$ )	120	200
Güç kontrolündeki PI denetleyici için integral ( $K_i$ )	5	2
Akım kontrolündeki PI denetleyici için oransal ( $K_p$ )	10	30
Akım kontrolündeki PI denetleyici için integral ( $K_i$ )	0,5	2,5

Tablo 3'teki değerlere göre şebekeden çekilen akımların THD değerleri Şekil 9'da verilmiştir. Elde edilen akım değerleri PSIM programının THD modülü ile hesaplanmıştır.

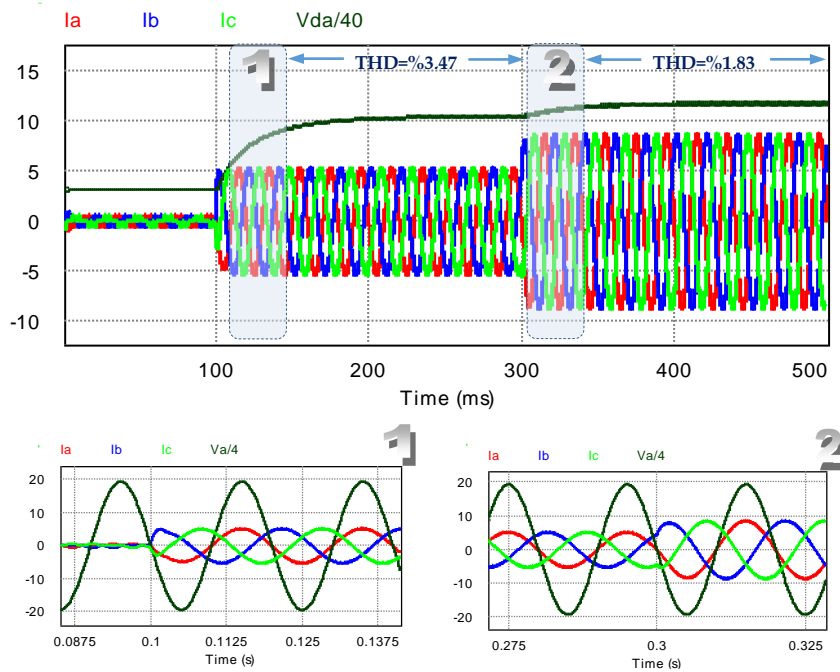


a)

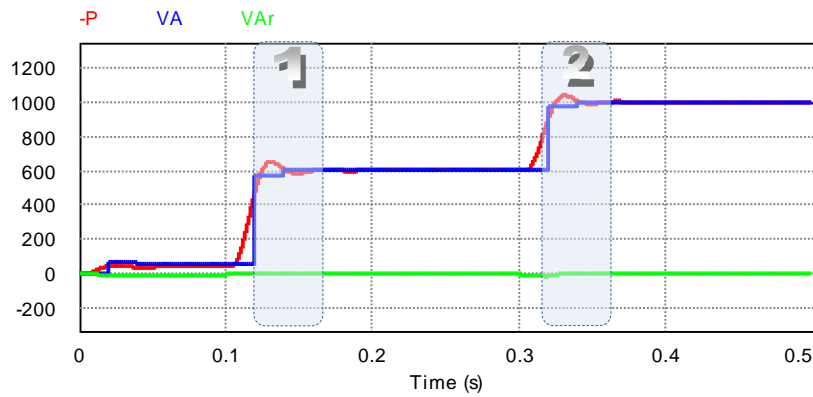
b)

**Şekil 9.** Şebekeden çekilen üç fazlı akımlar a)  $PI=Değer1$ , b)  $PI=Değer2$ 

Yapılan benzetim çalışmalarının sonuçlarında üç fazlı hat akımları, şebekenin A fazı, DA bara gerilimi, aktif ve reaktif güç değerleri incelenmiştir. Şekil 10'da farklı aktif güç değerleri için sistemin şebekeden çektiği üç fazlı akım değerleri ve DA bara gerilimi görülmektedir.

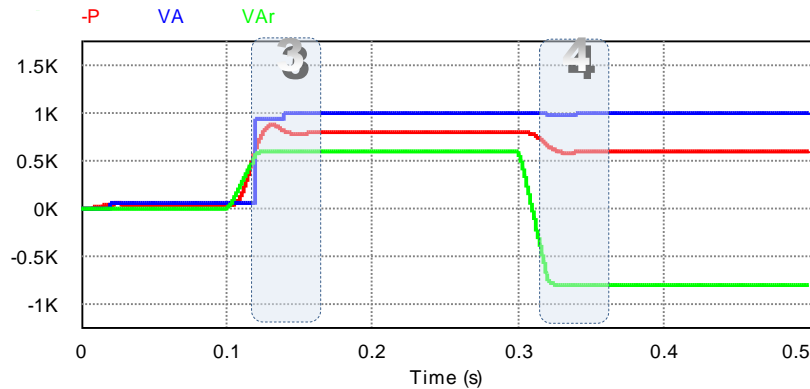
**Şekil 10.** Şebekeden çekilen üç fazlı akımlar ( $P_{ref}=600 W$  &  $1 kW$ )

600 W'lık aktif gücün çekilmesi için anahtarlama komutu 100 ms sonra verilmiştir. Sisteme komut verildikten sonra istenilen güce ulaşılması için geliştirilmiş denetleyici ile anahtarlama işlemi yapılır ve hesaplanan akım şebekeden çekilmeye başlanır. Anahtarlamanın başlaması sırasında anahtarların zorlanmaması için akım sıçramalarının oluşmaması gerekir. Bunun için ise denetleyicinin yeterince dinamik yapıda olması gerekmektedir. Şekil 10'da da görüldüğü gibi aktif güç komutu verildiği andaki akımların geçişleri sırasında herhangi bir sıçrama olmamaktadır. Ayrıca ani aktif güç komutu değişimlerine denetleyicinin verdiği tepki de incelenmiştir. Benzetim çalışmasında 300 ms anında 600 W güç aktarılırken 1 kW aktif güç komutu verilmiştir. Bu durumda denetleyicinin hızlı bir şekilde duruma adapte olarak çalışmasını sürdürdüğü ve referans güç değerine hızlıca ulaştığı görülmektedir. Aktif, reaktif ve görünür güçlerin geçişler sırasındaki durumu Şekil 11'de verilmiştir. Sisteme 600 W ve 1 kW aktif güç komutu verildiği durumlarda aktif gücün ve görünür gücün birbirine eşit çıktığı, reaktif gücün ise sıfır olduğu görülmektedir. Bu da aynı zamanda denetleyicinin güç kontrolündeki başarısını göstermektedir.



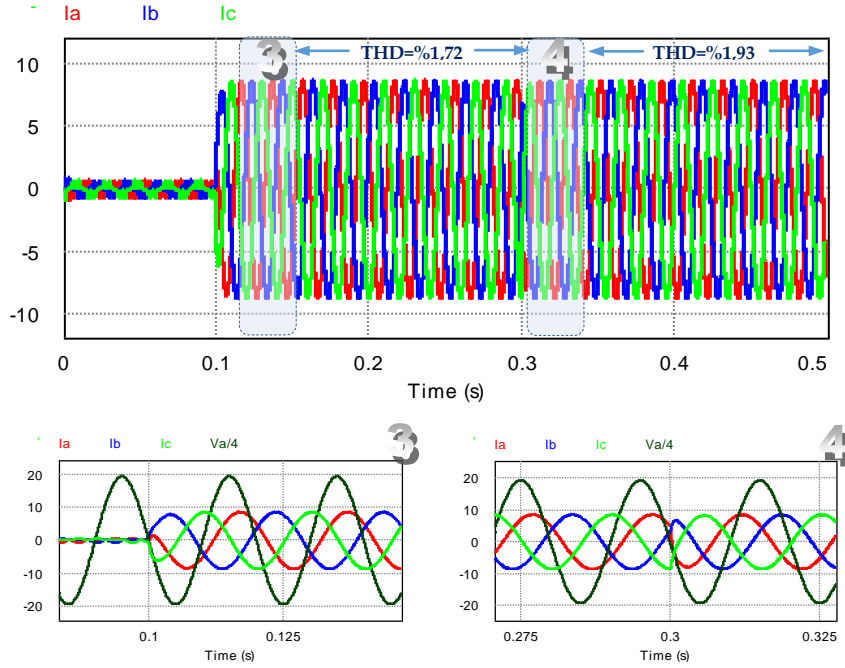
**Şekil 11.** Aktif, Reaktif ve Görünür güç durumları ( $P_{ref}=600\text{ W}$  &  $1\text{ kW}$ )

Şebekeden aktif güç çekilirken şebekeye endüktif veya kapasitif yönde reaktif güç desteği de verilebilmektedir. Görünür güç 1 kVA gücünde sabit kalacak şekilde aktif ve reaktif güç değişimleri Şekil 12'de görülmektedir. Sisteme 100 ms sonunda 800 W aktif güç 600 VAr reaktif güç referansı verilmiştir. 300 ms'den sonra ise 600 W aktif -800 VAr reaktif güç referansı verilmiştir.



**Şekil 12.** Farklı güç referansına göre çekilen güç durumları

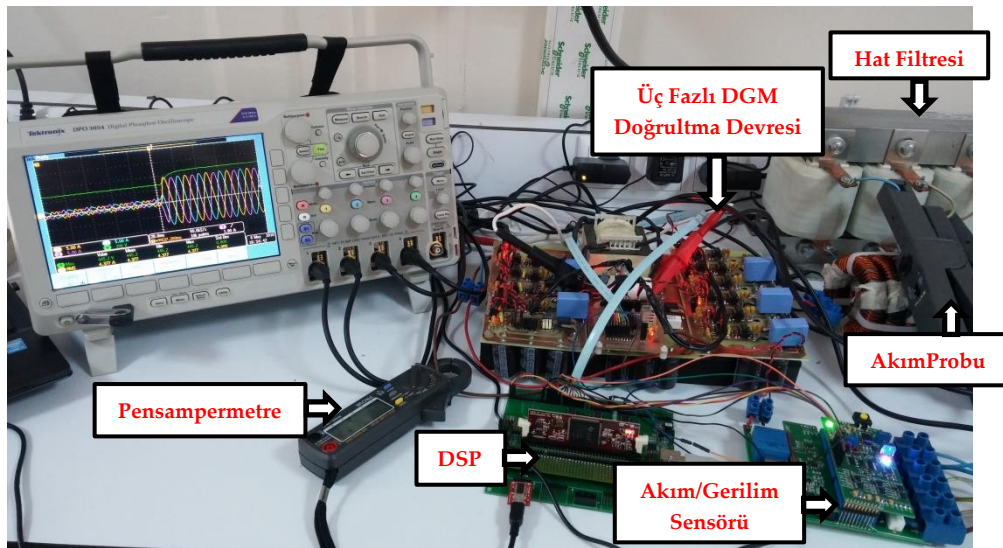
Sisteme verilen tüm güç komutlarında, denetleyici başarılı bir şekilde güç geçişlerini yapmaktadır. Şekil 13'te görüldüğü üzere sistem, hem endüktif hem de kapasitif yönde çekilmesi gereken akım referansına dinamik bir şekilde cevap vermektedir.



Şekil 13. Anahtarlama açısının endüktif yönden kapasitif yöne kayma durumu

#### 4. ÜÇ FAZLI DGM DOĞRULTUCUNUN DENEYSEL SONUÇLARI (EXPERIMENTAL RESULTS OF THE THREE-PHASE PWM RECTIFIER)

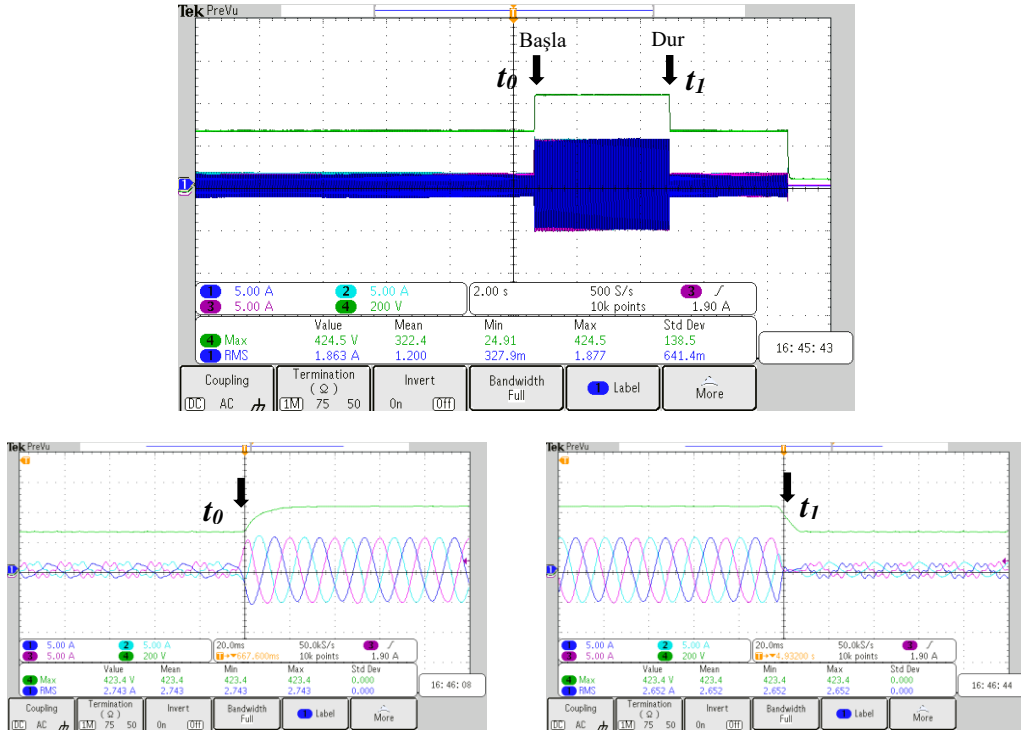
Tasarlanan sistemde güç aktarımının yapılabilmesi için yük olarak  $400 \Omega$  direnç ve devre çıkışında  $155 \mu\text{F}$  kondansatör kullanılmıştır. Şebekeyi izole etmek için  $5 \text{ kW}$  gücünde  $55 \text{ V}$ ,  $110 \text{ V}$  ve  $220 \text{ V}$  çıkışları olan kademeli bir transformatör kullanılmıştır. Hat filtresi olarak ise üç fazlı  $2 \text{ mH}$  değerinde bobin kullanılmıştır. Ayrıca  $4 \text{ mH}$  değerinde ortak mod filtre tasarlanarak toroid üzerine sarılıp devreye eklenmiştir. Deney düzeneği Şekil 14'te detaylı şekilde görülmektedir.



Şekil 14. Tasarlanan sistemin kurulu deney düzeneği

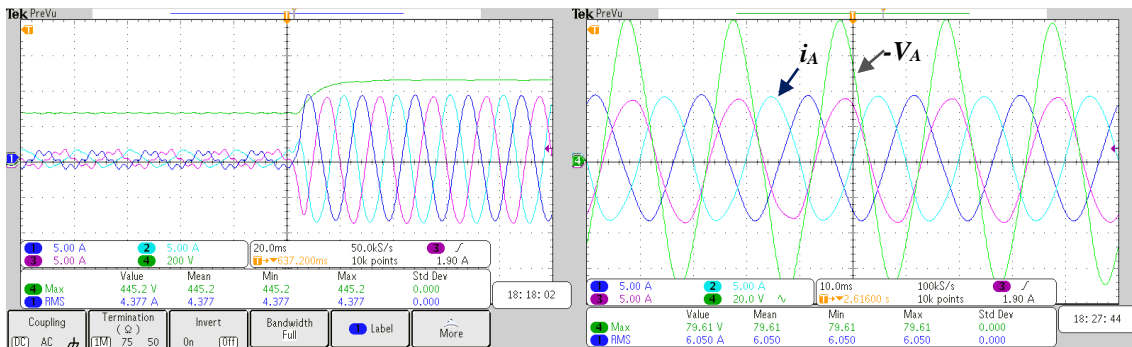
Ayrıca çalışmada, yüksek hızlı ve yüksek işlem kabiliyetine sahip olan Texas Instrument firmasının ürettiği TMS320F28335 DSP işlemcisi kullanılarak üç fazlı DGM doğrultucuda anahtarlar SVPWM

tekniki ile kontrol edilmiştir. DSP yongası, 16 adet 12 bit 25,5 Mhz örnekleme hızında ADC, 18 adet genel amaçlı PWM, 88 adet genel amaçlı giriş-çıkış birimi, 512 KB flash bellek, 68 KB RAM bellek, 2 KB ROM bellek özelliklerinde çevresel birimler içermektedir [30]. Tüm akım ve gerilim bilgileri akım/gerilim ölçüm ve hata okuma kartı tarafından DSP'ye aktarılmaktadır. Deneysel çalışmada akımlar ve DA bara gerilimi izoleli proplar ile ölçülmüştür. Sistem komut verildikten sonra benzetim çalışmasındaki gibi istenilen güce ulaşılabilmesi için geliştirilmiş denetleyici ile anahtarlama yapılarak gerekli olan akım şebekeden çekilmektedir. Şekil 15'te aktif güç komutu verildiği andaki akımların geçiş durumları görülmektedir.



Şekil 15. DA bara gerilimi ve akımların anahtarlama anında geçişleri ( $P_{ref}=600$  W)

Benzetim çalışmalarında da olduğu gibi şebekeye reaktif güç desteği verilmek istendiğinde anahtarlama açılı kaydırılarak istenilen reaktif güç verilebilmektedir. Deneysel çalışmada da sistem aktif güç çekerken şebekeye reaktif güç desteği verilmiştir. Şekil 16'da sistemin 800 W aktif güç, -600 VAR reaktif güç değerleri için şebekeden çektiği üç fazlı akım değerleri görülmektedir.



Şekil 16. Akımların anahtarlama anında geçişleri ve A fazı ( $P_{ref}=800$  W,  $Q_{ref}=-600$  VAR)

## 5. SONUÇ (CONCLUSION)

Yapılan bu çalışmada üç fazlı DGM doğrultma devresinin aktif ve reaktif güç kontrolünün benzetim ve deneysel sonuçları elde edilmiştir. Güç kontrolü için PI denetleyici ve şebeke frekans kontrolü için ise gelişmiş FKD algoritması kullanılmıştır. Algoritma yazılımları, PSIM programı içerisindeki basitleştirilmiş C bloğunun içerisine yazılmıştır. Sistem için gerekli olan üç fazlı sistemden dq düzlemine dönüşüm yapılarak doğrudan güç aktarım hesapları gerçekleştirilmiş ve farklı aktif-reaktif güç değerlerinde testler yapılmıştır. Tasarım sınırlarına uyularak yüke 1 kVA ya kadar güç aktarımı gerçekleştirilmiştir. Ayrıca şebekeye kapasitif güç aktarımı, -600 VAR reaktif güç desteği ile sağlanmıştır. Şebekeden çekilen akımların toplam harmonik bozulmasının ise % 5'in altında olması sağlanarak standartlara uygun güç aktarımı gerçekleştirilmiştir. Devrenin kontrolü için TMS320F28335 DSP kullanılmıştır. İşlemci için geliştirilen algoritmanın kodları ise PSIM programının sunduğu gömülü kod üretme yöntemi ile üretilmiştir.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Yildirim, D., Öztürk, S., Çadirci, I., & Ermiş, M. (2019). All SiC PWM rectifier-based off-board ultrafast charger for heavy electric vehicles. *IET Power Electronics*, 13(3), 483-494.
- [2] Benzaquen, J., Shadmand, M. B., Stonestreet, A., & Mirafzal, B. (2018). A unity power factor active rectifier with optimum space-vector predictive DC voltage control for variable frequency supply suitable for more electric aircraft applications. In *2018 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, 1455-1460.
- [3] Luqman, M., Yao, G., Zhou, L., Yang, D., & Lamichhane, A. (2019). Study and Implementation of a Cost-Effective 3L-Active Rectifier for DC Collection in WECS. In *E3S Web of Conferences*, Vol. 118, 1-5.
- [4] Liu, H., Li, C., Zheng, Z., Liu, J., & Li, Y. (2019). Shunt isolated active power filter with common DC link integrating braking energy recovery in urban rail transit. *IEEE Access*, 7, 39180-39191.
- [5] Schimpe, M., Becker, N., Lahlou, T., Hesse, H. C., Herzog, H. G., & Jossen, A. (2018). Energy efficiency evaluation of grid connection scenarios for stationary battery energy storage systems. *Energy procedia*, 155, 77-101.
- [6] Lee, J. Y., Heo, K. W., Kim, K. T., & Jung, J. H. (2020). Analysis and Design of Three-Phase Buck Rectifier Employing UPS to Supply High Reliable DC Power. *Energies*, 13(7), 1704.
- [7] Krismer, F., Hatipoglu, E., & Kolar, J. W. (2018). Novel isolated bidirectional integrated dual three-phase active bridge (D3AB) PFC rectifier. In *2018 International Power Electronics Conference (IPEC-Niigata 2018-ECCE Asia)*, 3805-3812.
- [8] Karafil, A., & Özbay, H. (2019). Power control of single phase active rectifier. *Balkan Journal of Electrical and Computer Engineering*, 7(3), 332-336.
- [9] Karafil, A. Effect of passive series damping resistor on single phase grid connected inverter with LCL filter. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, doi: 10.5505/pajes.2020.99896.
- [10] Fekik, A., Denoun, H., Azar, A. T., Hamida, M. L., Zaouia, M., & Benyahia, N. (2018). Comparative study of two level and three level PWM-rectifier with voltage oriented control. In *International Conference on Advanced Intelligent Systems and Informatics*, 40-51.
- [11] Yin, H., & Dieckerhoff, S. (2015). Experimental comparison of DPC and VOC control of a three-level NPC grid connected converter. In *2015 IEEE 6th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG)*, 1-7.



- [12] Dannehl, J., Wessels, C., & Fuchs, F. W. (2008). Limitations of voltage-oriented PI current control of grid-connected PWM rectifiers with LCL filters. *IEEE transactions on industrial electronics*, 56(2), 380-388.
- [13] Zhang, Y., Peng, Y., & Qu, C. (2016). Model predictive control and direct power control for PWM rectifiers with active power ripple minimization. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 52(6), 4909-4918.
- [14] Chikouche, T. M., Hartani, K., Bouzar, S., & Bouarfa, B. (2019). New Direct Power Control Based on Fuzzy Logic for Three-Phase PWM Rectifier. In *International Conference in Artificial Intelligence in Renewable Energetic Systems*, 246-258.
- [15] Ramos, G., Melo-Lagos, I. D., & Cifuentes, J. (2016). High performance control of a three-phase PWM rectifier using odd harmonic high order repetitive control. *Dyna*, 83(198), 27-36.
- [16] Zhang, Y., Long, J., Zhang, Y., Lu, T., Zhao, Z., & Jin, L. (2013). Table-based direct power control for three-level neutral point-clamped pulse-width modulated rectifier. *IET Power Electronics*, 6(8), 1555-1562.
- [17] Özbay, H., Öncü, S., & Kesler, M. (2017). SMC-DPC based active and reactive power control of grid-tied three phase inverter for PV systems. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(28), 17713-17722.
- [18] Bobrowska-Rafał, M., Rafał, K., Jasiński, M., & Kaźmierkowski, M. (2011). Grid synchronization and symmetrical components extraction with PLL algorithm for grid connected power electronic converters-a review. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Technical Sciences*, 59(4), 485-497.
- [19] Karafil, A., Ozbay, H., & Oncu, S. (2019). Design and Analysis of Single-Phase Grid-Tied Inverter With PDM MPPT-Controlled Converter. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 35(5), 4756-4766.
- [20] Özbay, H. (2020). PDM-MPPT based solar powered induction heating system. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, doi: 10.1016/j.jestch.2020.06.005.
- [21] Öncü, S., & Özbay, H. (2015). Simulink model of parallel resonant inverter with DSP based PLL controller. *Elektronika Ir Elektrotehnika*, 21(6), 14-17.
- [22] Liu, B., Zhuo, F., Zhu, Y., Yi, H., & Wang, F. (2014). A three-phase PLL algorithm based on signal reforming under distorted grid conditions. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 30(9), 5272-5283.
- [23] Wu, F., Zhang, L., & Duan, J. (2014). A new two-phase stationary-frame-based enhanced PLL for three-phase grid synchronization. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 62(3), 251-255.
- [24] Arulkumar, K., Palanisamy, K., & Vijayakumar, D. (2016). Recent advances and control techniques in grid connected PV system—A review. *International Journal of Renewable Energy Research*, 6(3), 1037-1049.
- [25] Hasan, N. S., Rosmin, N., Osman, D. A. A., & Musta'amal, A. H. (2017). Reviews on multilevel converter and modulation techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80, 163-174.
- [26] Narayanan, G., Zhao, D., Krishnamurthy, H. K., Ayyanar, R., & Ranganathan, V. T. (2008). Space vector based hybrid PWM techniques for reduced current ripple. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 55(4), 1614-1627.

- [27] Zhan, C., Ramachandaramurthy, V. K., Arulampalam, A., Fitzer, C., Kromlidis, S., Bames, M., & Jenkins, N. (2001). Dynamic voltage restorer based on voltage-space-vector PWM control. *IEEE transactions on Industry applications*, 37(6), 1855-1863.
- [28] Patjoshi, R. K., & Mahapatra, K. (2016). Resistive optimization with enhanced PLL based nonlinear variable gain fuzzy hysteresis control strategy for unified power quality conditioner. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 83, 352-363.
- [29] Ali, Z., Christofides, N., Hadjidemetriou, L., Kyriakides, E., Yang, Y., & Blaabjerg, F. (2018). Three-phase phase-locked loop synchronization algorithms for grid-connected renewable energy systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 90, 434-452.
- [30] Elrajoubi, A., Ang, S. S., & Abushaiba, A. (2017, July). TMS320F28335 DSP programming using MATLAB Simulink embedded coder: Techniques and advancements. In *2017 IEEE 18th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL)*, 1-7.

## Development of a Graphical Interface that can be used for LLC Resonant DC-DC Converter Design

 Mehmet KUBİLAY\*  M. Timur AYDEMİR 

Gazi University Faculty of Engineering, Department of Electrical Electronics Engineering, 06570, ANKARA

### Graphical/Tabular Abstract

#### Article Info:

Research article

Received: 20/05/2020

Revision: 15/06/2020

Accepted: 03/07/2020

#### Highlights

- DC/DC converter
- Matlab
- PLECS

#### Keywords

 LLC Resonant Converter  
 Graphical User Interface  
 Soft Switching  
 High Efficiency

In this paper, design of LLC resonant DC-DC converters, which have advantages such as high efficiency, low electromagnetic interference (EMI) and high power density, is presented. An interface is designed in MATLAB using by the first harmonic approximation (FHA) analysis method to calculate circuit parameters. The accuracy of the parameters calculated by the interface is tested with simulations conducted in PLECS. Simulation results have shown that intended efficiency and zero voltage switching (ZVS) are achieved over a wide load range, including low load conditions.

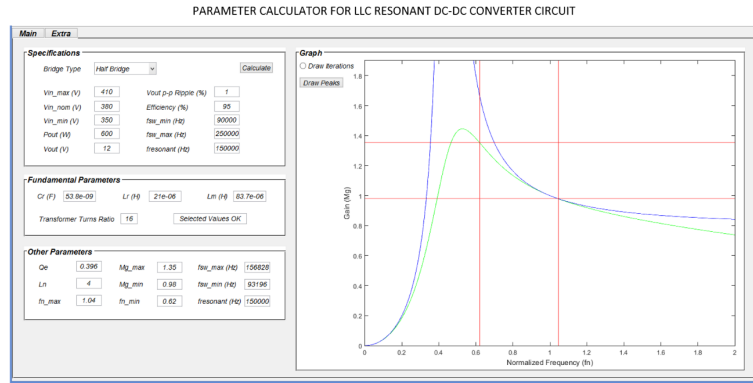


Figure A. Circuit schema of the SST design

**Purpose:** The main motivation of this study is to design an interface that presents the necessary parameters for the LLC resonant converter intended to be designed. The interface uses the first harmonic approximation (FHA) analysis method in calculations and aims optimal selection of quality factor ( $Q$ ) and inductance ratio ( $L_n$ ).

**Theory and Methods:** MATLAB is used for interface design. Firstly, the LLC resonant DC-DC converter topology has been studied, and then the first harmonic approximation (FHA) analysis method has been explained. Simulations have been conducted in PLECS and thermal modeling method has been used in order to make the efficiency calculations to represent real conditions.

**Results:** Simulations at 3 different power levels have been conducted. The results have shown that zero voltage switching (ZVS) is achieved over a wide load range. Additionally, maximum efficiency results have been obtained between 95% and 97%.

**Conclusion:** In this study, a LLC resonant converter design approach that aims to achieve high efficiency is discussed by using FHA analysis method. With this approach, an interface has been designed in MATLAB. The accuracy of the parameters calculated by the interface is tested with simulations conducted in PLECS. The obtained results have shown that reliable results are produced by the presented interface.

GU J Sci, Part C, 8(3): 632-643 (2020)



Gazi Üniversitesi

**Fen Bilimleri Dergisi**  
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ


<http://dergipark.gov.tr/gujsc>

## LLC Rezonanslı DA-DA Dönüştürücü Tasarımında Kullanılabilecek Bir Grafıksel Arayüzün Geliştirilmesi

Mehmet KUBİLAY\* M. Timur AYDEMİR

Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Müh. Bölümü, 06570, Maltepe, ANKARA

### Öz

Bu çalışmada yüksek verimlilik, düşük elektro manyetik girişim (EMG) ve yüksek güç yoğunluğu gibi avantajlara sahip olan LLC rezonans DA-DA dönüştürücü tasarımı ele alınmıştır. MATLAB programı ile temel harmonik yaklaşım (FHA) analiz metodu kullanarak devre parametrelerini hesaplayan bir arayüz tasarımı yapılmıştır. Tasarlanan arayüzde, yüksek verimlilik elde edebilmek için en uygun kalite çarpanı ( $Q$ ) ve endüktans oranı ( $L_n$ ) seçimini hedefleyen bir optimizasyon yapılmıştır. Arayüz ile hesaplanan parametrelerin doğruluğunun test edilebilmesi için PLECS programı kullanılarak 3 farklı güç seviyesinde benzetimler yapılmıştır. LLC rezonans dönüştürücünün çıkış gerilimini düzenlemek için değişken frekans kontrol yöntemi kullanılmıştır. Benzetim sonuçlarıyla düşük yük durumları da dâhil olmak üzere geniş bir yük aralığında sıfır gerilim anahtarlamasının (SGA) sağlandığı görülmüştür. Yine bu yük durumları için verim ölçümleri yapılarak verim grafikleri çıkarılmıştır. Grafikler incelendiğinde üç farklı çıkış gücü için maksimum verimin %95 ile %97 arasında elde edildiği görülmüştür. Yapılan verim hesaplamalarının gerçek koşullara uygun olması amacıyla PLECS programında ısıl modelleme yöntemi kullanılmıştır.

### Makale Bilgisi

Araştırma makalesi  
Başvuru: 20/05/2020  
Düzeltilme: 15/06/2020  
Kabul: 03/07/2020

### Anahtar Kelimeler

LLC Rezonans  
Dönüştürücü  
Grafıksel Kullanıcı  
Arayüzü  
Yumuşak Anahtarlama  
Yüksek Verim

### Keywords

LLC Resonant Converter  
Graphical User Interface  
Soft Switching  
High Efficiency

## Development of a Graphical Interface that can be used for LLC Resonant DC-DC Converter Design

### Abstract

In this paper, the design process of LLC resonant DC-DC converters, which have advantages such as high efficiency, low electromagnetic interference (EMI) and high power density, is presented. An interface which uses the first harmonic approximation (FHA) analysis method to calculate circuit parameters has been designed in MATLAB environment. The interface was optimized to choose the most suitable quality factor ( $Q$ ) and inductance ratio ( $L_n$ ) in order to provide high efficiency. Simulations have been carried out in PLECS software for three different power levels to verify the parameters calculated by the developed interface. Variable frequency control method has been used to regulate the output voltage of the LLC resonant converter. Simulation results show that zero voltage switching (ZVS) is achieved over a wide load range, including low load conditions. Also, efficiencies in these load conditions have been measured and the efficiency graphs are presented. When the graphics are examined, it is observed that the maximum efficiency is between 95% and 97% for the three different output power levels chosen. Thermal modeling method has been used in PLECS in order to make the efficiency calculations to resemble the realistic conditions.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzün gelişmekte olan güç elektroniği dünyasında, güç dönüştürücülerinden beklenen özellikler değişmektedir. Güç dönüştürücüleri için küçük boyut, yüksek verimlilik ve yüksek güç yoğunluğu en önemli isterler haline gelmiştir. Dönüştürücü boyutunu küçültebilmek ve güç yoğunluğunu arttırabilmek için yüksek anahtarlama frekanslarında çalışarak transformatör, endüktör ve kondansatör gibi hacimli pasif elemanların boyutlarını küçültmek gerekmektedir. Fakat anahtarlama frekansını arttırmak paralelde anahtarlama kayıplarını da arttırmaktadır [1], [2], [3]. Geleneksel PWM dönüştürücülerde anahtarlama işlemi yük altında yapılırken, rezonans dönüştürücülerde anahtarlama sıfır akım ya da sıfır gerilimde

yapılabilmektedir. Bu durum rezonans dönüştürücülerde anahtarlama kayıplarını azaltarak anahtarlama frekansının arttırılabilmesine imkan tanımaktadır [4], [5]. Bu nedenlerle rezonans dönüştürücüler en çok tercih edilen topolojiler haline gelmiştir.

İçerdiği pasif rezonans tank elemanı (L, C) sayısına bağlı olarak değişen bir çok rezonans dönüştürücü konfigürasyonu vardır [6], [7]. Seri rezonans (SRC) [8], [9] ve paralel rezonans dönüştürücüler (PRC) [10], iki rezonans elemanından oluşan en temel rezonans dönüştürücülerdir. Seri rezonans dönüştürücüler, reaktif akımları minimuma indirerek yüksek kısmi yük verimi sağlarken yüksüz durumda çıkış gerilim regülasyonunu sağlayamazlar [11]. Paralel rezonans dönüştürücüler ise, seri rezonans dönüştürücülerin aksine yüksüz durumlarda rezonans frekans üzerinde çalışarak çıkış gerilimini kontrol edebilirler. Buna karşın hafif yüklerde düşük verimlidirler [12].

SRC ve PRC'nin bahsedilen bu dezavantajlarını önleyebilmek için üç rezonans elemanına sahip LLC en yaygın kullanılan rezonans dönüştürücü topolojilerindedir. LLC rezonans dönüştürücüler çıkış gerilimi regülasyonunu dar bir frekans aralığında gerçekleştirirler [11]. Bunun yanı sıra primer anahtarlar için sıfır gerilim anahtarlama (SGA) ve senkron doğrultucular için sıfır akım anahtarlama (SAA) özelliği ile elektromanyetik girişimi (EMG) de azaltırlar [13], [14].

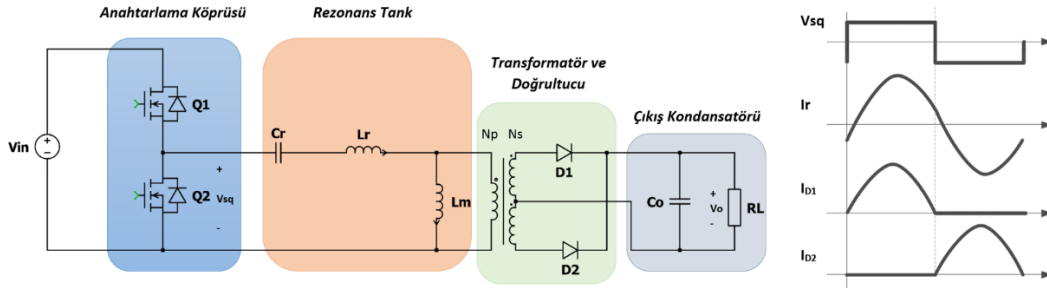
Bu avantajlarının yanı sıra LLC rezonans dönüştürücü tasarım parametreleri belirlenirken dikkat edilmesi gereken bazı noktalar vardır. Geniş bir yük aralığında, dönüştürücünün dar bir frekans bandında kontrolünün sağlanabilmesi için LLC rezonans dönüştürücü  $f_0$  rezonans frekansı civarında çalışacak şekilde tasarlanmalıdır. Ayrıca LLC rezonans dönüştürücünün en önemli avantajlarından biri verimliliğidir. Bu verimlilik tüm çalışma aralığında primer taraf anahtarlar için sıfır gerilim anahtarlamanın (SGA) sağlanabilmesiyle büyük ölçüde elde edilir. Tüm çalışma aralığında SGA'nın sağlanabilmesi için en uygun  $L_n - Q_e$  değeri yapılan yinelemeli işlemler sonucu hesaplanmalıdır [15]. Bu durumlar göz önüne alındığında PWM dönüştürücüler ve temel rezonans dönüştürücülere kıyasla tasarımcılar için LLC rezonans dönüştürücü tasarımı ve optimizasyonu daha karmaşık bir konu haline gelmektedir. Literatürde LLC rezonans dönüştürücü tasarımı hakkında birçok araştırma bulunmaktadır [15-17]. Ancak LLC rezonans dönüştürücü tasarımının karmaşıklığı konusunda kullanıcılara kolaylık sağlayacak bir arayüz geliştirilmemiştir. Bu çalışma kapsamında avantajları ile dikkat çeken LLC rezonans dönüştürücülerin devre parametrelerini hesaplayarak kullanıcıya tasarımı konusunda kolaylık sağlayacak bir arayüz yazılımı geliştirilmiştir. Arayüz, sunduğu veriler ve grafikler sayesinde kullanıcılara LLC topolojisinin çalışma mantığı ve tasarım kriterleri açısından öğretici bilgiler vermektedir. Bunun yanı sıra tasarım ve optimizasyon süresini kısaltacağı ve devre elemanlarının seçimi konusunda kullanıcıya kolaylık sağlayacağı için LLC rezonans dönüştürücü topolojisi kullanımının yaygınlaşmasında fayda sağlayacağı düşünülmektedir.

Makalenin ikinci bölümünde LLC rezonans dönüştürücü çalışma prensibi genel hatlarıyla anlatılmıştır. LLC rezonans dönüştürücü tasarımında rezonans tank elemanları hesaplanırken kalite çarpanı ( $Q$ ) ve endüktans oranının ( $L_n$ ) seçimi önem arz etmektedir. Üçüncü bölümde devre parametrelerini optimum  $Q$  ve  $L_n$  değerlerine göre hesaplamasını sağlayan bir arayüz tasarımı anlatılmıştır. Dördüncü bölümde üç farklı güç seviyesi için hazırlanan benzetimlerin sonuçları değerlendirilerek arayüz tarafından hesaplanan parametrelerin doğruluğu kontrol edilmiştir. Son olarak beşinci bölümde yapılan tüm çalışmalar ve sonuçları yorumlanmıştır.

## 2. LLC REZONANS DA-DA DÖNÜŞTÜRÜCÜ ÇALIŞMA PRENSİBİ (OPERATION PRINCIPLE OF LLC RESONANT DC-DC CONVERTER)

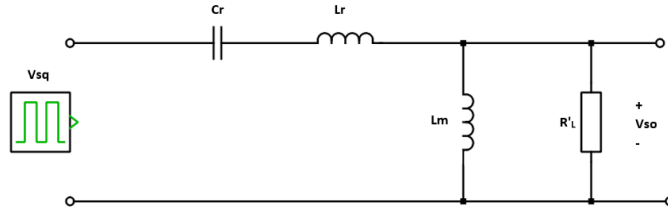
Yarım köprü LLC rezonans dönüştürücü topolojisinin genel şeması Şekil 1'de verilmiştir. Görüldüğü gibi dönüştürücü dört bölümden oluşmaktadır. Anahtarlama köprüsü, tam köprü ya da yarım köprü olarak seçilebilir.  $Q_1$  ve  $Q_2$  MOSFET'leri, anahtarlama periyodunun yarısında çalışarak rezonans tankı uyarmak için kare dalga üretirler ( $V_{sq}$ ). SGA elde edebilmek için anahtarlama geçişleri arasına küçük bir ölü zaman eklenir. Rezonans tank devresi, rezonans kondansatörü ( $C_r$ ), rezonans endüktörü ( $L_r$ ) ve mıknatıslanma endüktörü ( $L_m$ ) olmak üzere üç elemandan oluşur. Rezonans tank devresi, yüksek dereceli harmonik akımları süzer. Rezonans tankı, girişine kare dalga uygulanmasına rağmen üzerinden sadece sinüzoidal akımın akmasına izin verir. Şekil 1'de görüldüğü gibi rezonans tankı üzerinden akan akım ( $I_p$ ), rezonans tankına uygulanan gerilimden ( $V_{sq}$ ) geridedir. Bu durum MOSFET'lerin sıfır gerilim altında açılmasını sağlar. Sekonder tarafında bulunan iki diyot ( $D_1, D_2$ ) orta uçlu doğrultucuyu oluşturur. Transformator ile

genliği düşürülen rezonans sinüzoidal akım burada doğrultulur. Çıkış kondansatörü ( $C_o$ ), doğrultulmuş AA akımı süzerek DA çıkış gerilimi sağlar [15-17].



Şekil 1. Yarım Köprü LLC Rezonans Dönüştürücü Devre Şeması

LLC rezonans dönüştürücü çalışma mantığını daha iyi anlayabilmek için, dönüştürücü eşdeğer devresi ve gerilim kazancını incelemek gerekir. Şekil 2'de rezonans dönüştürücünün eşdeğer devresi verilmiştir. Dönüştürücü kazancı, anahtarlama köprüsü kazancı, rezonans tank kazancı ve transformator sarım oranının ( $N_p/N_s$ ) çarpımıdır. Anahtarlama köprüsü kazancı tam köprü konfigürasyonu için 1, yarım köprü konfigürasyonu için 0.5 olarak hesaplanır. Rezonans tankının kazancı ise Şekil 2'de verilen eşdeğer devrenin transfer fonksiyonunun genliğidir. Rezonans tankının kazancı ( $M_g$ ), 1 numaralı denklem ile verilmiştir [17].



Şekil 2. LLC Rezonans Dönüştürücü Eşdeğer Devresi

Denklem 1'de gösterilen üç adet birimsiz parametreden  $L_n$  endüktansların arasındaki oranı,  $Q_e$  kalite çarpanını ve  $f_n$  normalize frekansı yani anahtarlama frekansının ( $f_{sw}$ ), rezonans frekansına ( $f_0$ ) oranını ifade etmektedir [15]. Denklemden de görüldüğü gibi kazanç  $L_n$ ,  $Q_e$  ve  $f_n$  parametrelerine bağlı olarak değişir. Devre elemanları belirlendikten sonra  $L_n$  ve  $Q_e$  parametreleri sabitleneceği için, bu denklemde,  $f_n$  kontrol değişkenidir. Devrenin kontrolü, rezonans frekans sabit olduğu için, anahtarlama frekansı değiştirilerek sağlanır [2].

$$M_g = \left| \frac{L_n \times f_n^2}{[(L_n + 1) \times f_n^2 - 1] + j[(f_n^2 - 1) \times f_n \times Q_e \times L_n]} \right| \quad 1$$

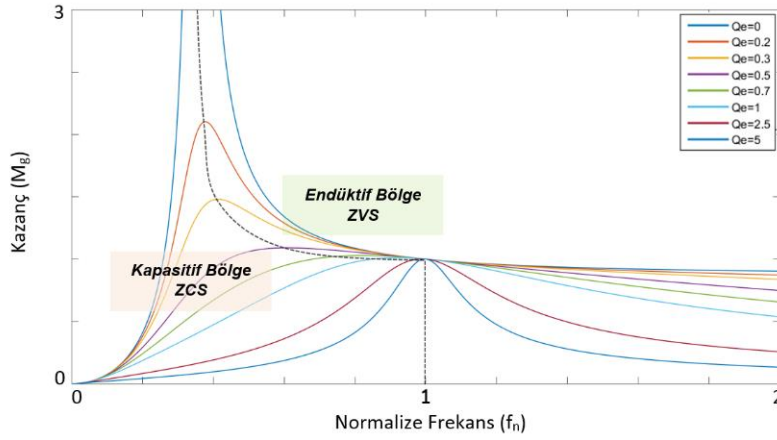
$$L_n = \frac{L_m}{L_r} \quad 2$$

$$Q_e = \frac{\sqrt{L_r/C_r}}{R_e} \quad 3$$

$$f_n = \frac{f_{sw}}{f_0} \quad 4$$

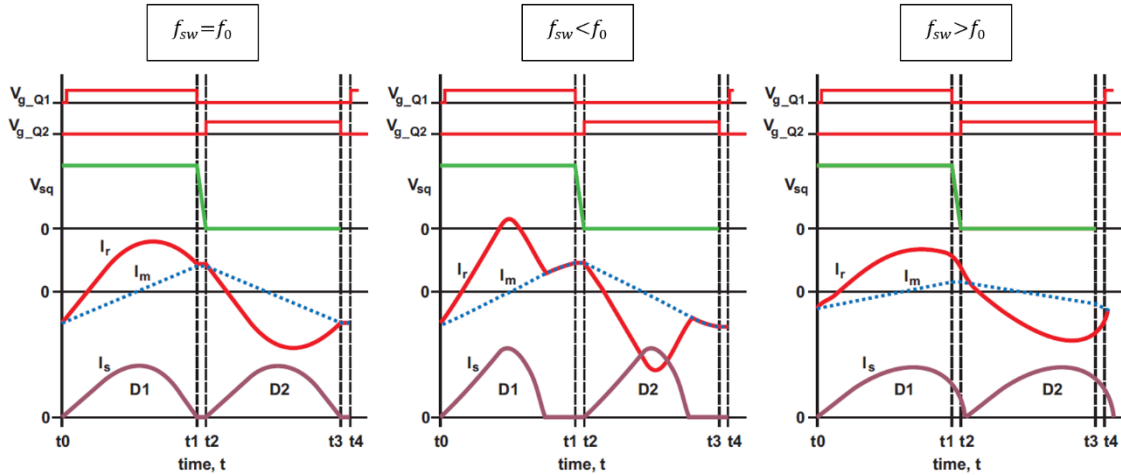
Rezonans tankı kazancının ( $M_g$ ), farklı kalite çarpanları ( $Q_e$ ) ve sabit bir  $L_n$  değeri için normalize frekansa ( $f_n$ ) göre değişimi, MATLAB programında çizdirilmiş ve sonuç Şekil 3'te verilmiştir. Grafikte düşük  $Q_e$  değerleri hafif yükleri, yüksek  $Q_e$  değerleri ise ağır yükleri ifade etmektedir. Kazancın değeri yükten bağımsız olarak rezonans frekansında bire eşittir. Görüldüğü gibi eğrilerin tepe noktalarını birleştiren kesikli çizgi kapasitif ve endüktif çalışma bölgeleri arasındaki sınırı oluşturmaktadır. Endüktif bölgede, rezonans tank akımı ( $I_p$ ), rezonans tankına uygulanan gerilimden ( $V_{sq}$ ) geride olduğu için sıfır gerilimde anahtarlama (SGA) gerçekleşir. Kapasitif bölgede ise  $I_p$ ,  $V_{sq}$ 'dan ileride olduğu için sıfır akımda anahtarlama (SAA) gerçekleşir. Genellikle, MOSFET uygulamalarında SGA tercih edilmektedir. Bu durum çalışma frekans aralığını SGA'nın sağlandığı endüktif bölge içinde tutmayı gerekli kılar. Kapasitif bölgeye

geçişini önleyebilmek için minimum anahtarlama frekansı, endüktif ve kapasitif bölgeyi ayıran tepe kazanç frekansı ile sınırlı tutulmalıdır [16], [18], [19].



Şekil 3. Rezonans Tank Gerilim Kazancı

LLC rezonans dönüştürücü, Şekil 4'te gösterildiği gibi rezonans frekans altında, üstünde ve rezonans frekansta olmak üzere üç modda çalışabilir. Anahtarlama frekansı, rezonans frekansa eşit olduğunda ( $f_{sw} = f_0$ ) rezonans tank kazancı birdir ve en iyi çalışma noktası elde edilir. Anahtarlama periyodunun yarısında, mıknatıslanma akımı ( $I_m$ ), rezonans akımına ( $I_r$ ) eşitlenir. Kesintisiz güç aktarımı vardır. Primer MOSFET'lerde SGA ve doğrultucu diyotlarda yumuşak anahtarlama sağlanır [17], [2]. Anahtarlama frekansı, rezonans frekansının altında çalıştığı durumda ( $f_{sw} < f_0$ ) anahtarlama yarı döngüsü tamamlanmadan ( $I_m$ ), ( $I_r$ )'ye eşitlenir ve güç aktarımı anahtarlama yarı döngüsü sonlanana kadar durur. Primer MOSFET'lerde SGA ve doğrultucu diyotlarda yumuşak anahtarlama sağlanır. Rezonans tankta yüksek dolaşım akımı oluşur. Bu durum iletim kayıplarının artmasına neden olur. Anahtarlama frekansının, rezonans frekansının üzerinde olduğu durumda ( $f_{sw} > f_0$ ) primer MOSFET'lerde SGA sağlansa da tıkamaya geçiş kayıpları artar. Sekonder diyotlarda yumuşak anahtarlama gerçekleşmez ve ters toparlanma kayıpları oluşur [15], [20].

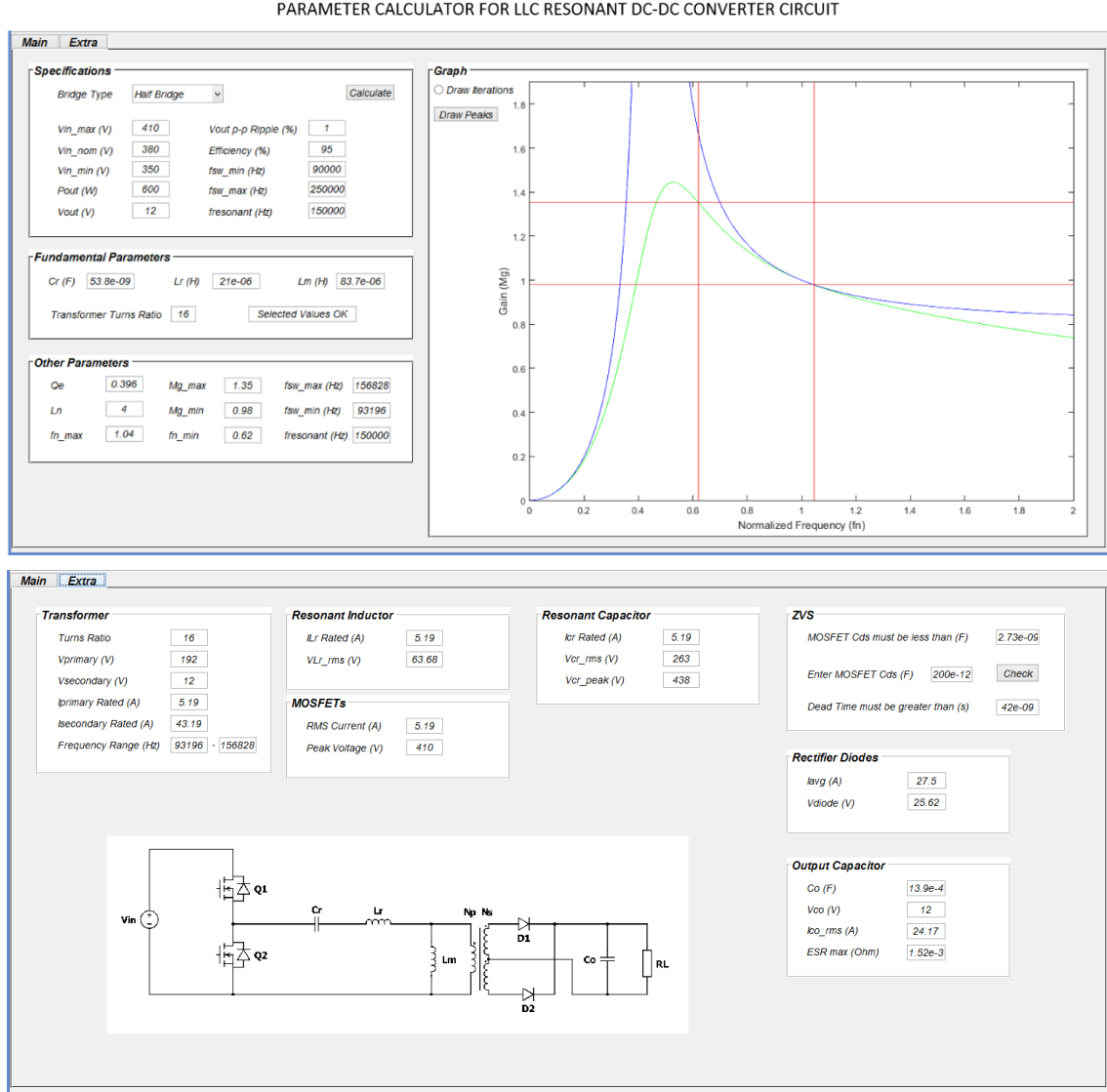


Şekil 4. LLC Rezonans Dönüştürücü Çalışma Bölgeleri [15]

### 3. LLC REZONANS DA-DA DÖNÜŞTÜRÜCÜ DEVRE PARAMETRELERİNİ HESAPLAYAN ARAYÜZ TASARIMI (INTERFACE DESIGN THAT CALCULATES LLC RESONANT DC-DC CONVERTER CIRCUIT PARAMETERS)

LLC rezonans dönüştürücü yüksek verimlilik, düşük elektromanyetik girişim (EMG) ve yüksek güç yoğunluğu gibi avantajları ile dikkat çekse de tasarım ve optimizasyonu karmaşık bir topolojidir. Bu çalışma kapsamında geliştirilen bir arayüz yazılımı ile kullanıcılar için LLC rezonans dönüştürücü tasarım ve optimizasyon aşamalarının kolaylaştırılması ve pratik hale getirilmesi hedeflenmektedir. Geliştirilen bu

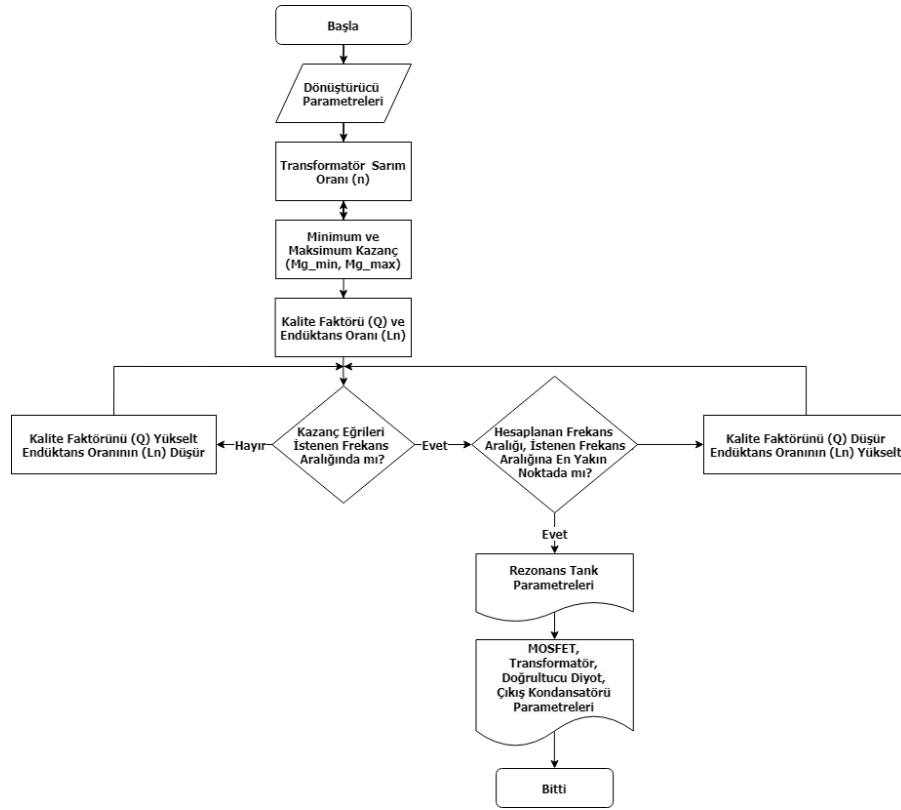
arayüz ile FHA yöntemi kullanılarak, MATLAB programı ile LLC rezonans dönüştürücü parametreleri ve devre elemanlarının seçimine yardımcı olacak veriler hesaplanmaktadır. Arayüz, girdi olarak kullanıcıdan; giriş gerilim aralığı, çıkış gücü, çıkış gerilimi ve çıkış gerilim dalgalanma oranı, çalışılmak istenen frekans aralığı, hedeflenen verim ve anahtarlama köprüsünün konfigürasyon bilgilerini alır. MOSFET'lere, rezonans tank elemanlarına, transformatöre, doğrultucu diyotlara ve çıkış kondansatörüne ait parametreler ile devrenin çalışacağı frekans aralığı ve rezonans frekansı ise arayüzün çıktılarıdır. Hazırlanan arayüz görünümü Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 5. Arayüz Görünümü

LLC rezonans dönüştürücü iki rezonans frekansa sahiptir ( $f_0, f_p$ ). Bunlardan biri ( $f_0$ ),  $L_r$  ve  $C_r$ 'nin rezonansa girmesi ile elde edilir. Diğeri ise  $L_r$ ,  $C_r$  ve  $L_m$ 'nin rezonansa girmesi ile elde edilen  $f_p$ 'dir. Şekil 3'te gösterildiği gibi  $f_0$  rezonans frekansında yükten bağımsız olarak kazanç bire eşittir. Bu LLC rezonans dönüştürücülerini seri rezonans dönüştürücülerden avantajlı kılan en önemli özelliktir. Bu nedenle LLC rezonans dönüştürücüler  $f_0$  civarında çalışacak şekilde tasarlanırlar. Bu durum bize, rezonans tank akımının rezonans frekans civarında bir sinüzoidal olduğu yönünde ipucu verir. Bu ipucunun yanı sıra rezonans tankın yüksek harmonikleri filtreleme davranışı da göz önüne alındığında, LLC rezonans dönüştürücü tasarımında temel harmonik yaklaşım (FHA) metodu kullanımının güvenilir sonuçlar verdiği kabul edilmektedir. Bu yaklaşım rezonans tank girişine uygulanan kare dalga geriliminin, sadece temel bileşenin güç aktarımına katkıda bulunduğunu varsayar. Böylece tank geriliminin ve tank akımının yüksek dereceli harmoniklerini ihmal eder ve tamamen sinüzoidal olarak ele alır [15], [16]. Arayüz yazılımının akış diyagramı Şekil 6'da verilmiştir.





Şekil 6. Yazılım Akış Diyagramı

Şekil 6’da görüldüğü gibi arayüzde girilen parametreler doğrultusunda ilk olarak transformatör sarım oranı hesaplanır. Transformatör sarım oranı ( $n$ ); nominal kazançta, nominal giriş geriliminin nominal çıkış gerilimine oranı olarak hesaplanır. Denklem 5’te görüldüğü gibi hesaplama anahtarlama köprüsü konfigürasyonuna göre değişiklik göstermektedir.

$$n = M_{g\_nom} \frac{V_{in\_nom}}{V_{o\_nom}} k_{sw} \Big|_{M_{g\_nom}=1} \begin{cases} tam köprü, k_{sw} = 1 \\ yarım köprü, k_{sw} = 0.5 \end{cases} \quad 5$$

Çıkış gerilim regülasyonunu sağlayabilmek için tüm yük koşullarını içine alan minimum ve maksimum kazanç değerleri ( $M_{g\_max}, M_{g\_min}$ ) hesaplanır ve Şekil 5’te görüldüğü gibi grafik üzerinde kırmızı yatay çizgiler ile gösterilir. Dönüştürücü minimum giriş geriliminde ve tam yük koşulundayken maksimum kazanç ile çalışır. Diğer taraftan maksimum giriş gerilimi ve minimum çıkış gerilimi durumunda da dönüştürücü kazancı minimum olacaktır. Bu doğrultuda  $M_{g\_max}, M_{g\_min}$  değerleri denklem 6 ve 7’de gösterildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$M_{g\_min} = \frac{n \times V_{o\_min}}{V_{in\_max}/k_{sw}} \begin{cases} tam köprü, k_{sw} = 1 \\ yarım köprü, k_{sw} = 0.5 \end{cases} \quad 6$$

$$M_{g\_max} = \frac{n \times V_{o\_max}}{V_{in\_min}/k_{sw}} \begin{cases} tam köprü, k_{sw} = 1 \\ yarım köprü, k_{sw} = 0.5 \end{cases} \quad 7$$

Yukarıda Şekil 3’te anlatıldığı gibi LLC rezonans dönüştürücüler, tepe kazanç frekansının üstünde endüktif bölgede çalışabilirler ve SGA’nın sağlanabilmesi için bu bölgede çalışmaları istenir. Bu nedenle tepe kazanç belirlenmesi kritik olan bir parametredir. Denklem 1’de de görüldüğü gibi kazanç eğrileri  $L_n$  ve  $Q_e$  değerlerine bağlı olarak değişir. Bunun yanı sıra  $L_n$  değerinin büyük seçilmesi, mıknatıslanma akımını azaltarak iletim kayıplarının düşmesini sağlar. Fakat  $L_n$ ’nin yükselmesi, tepe kazanç değerini düşüreceği için SGA’yı olumsuz yönde etkileyecektir. Yüksek  $Q_e$  değerleri ise kazanç eğrisini daraltarak dar bir frekans kontrol aralığı sağlayacaktır. Buna karşın yine tepe kazanç değerini düşüreceği için SGA’yı olumsuz yönde etkileyecektir [21]. Anlaşılabacağı üzere optimal  $L_n$  ve  $Q_e$  seçiminin rezonans tank elemanlarının hesaplanmasındaki önemi büyüktür. Tasarlanan arayüz, belirlenen bir aralıkta her bir  $L_n$  ve  $Q_e$  değerine karşılık gelen tepe kazanç değerlerini bir matriste tutar. Yük geçişlerinde ve ilk çalışma anında

da SGA'yı garanti edebilmek için hesaplanan  $M_{g,max}$  değerine % 10 tolerans eklenerek yeni bir tepe değeri elde edilir [16]. Oluşturulan matriste bu değere karşılık gelen  $L_n - Q_e$  çiftleri bulunur. Belirli bir kazanç noktasına karşılık gelen  $L_n$  değerleri artarken  $Q_e$  değerleri azalmakta ya da tam tersi durum söz konusu olmaktadır. Yapılan çalışmalarda  $L_n$ 'nin arttığı  $Q_e$ 'nin azaldığı yönde çalışma frekans aralığının genişlediği ve tam ters yönde çalışma frekans aralığının daraldığı görülmüştür. Şekil 5'teki grafikte görüldüğü gibi minimum çalışma frekansı tam yükteki kazanç eğrisi ile  $M_{g,max}$  doğrusunun kesişim noktası olarak alınır. Maksimum çalışma frekansı ise yüksüz durumdaki kazanç eğrisi ile  $M_{g,min}$  doğrusunun kesişimi olarak alınmaktadır [15]. Bu bilgiler doğrultusunda Şekil 6'da gösterildiği üzere kullanıcı tarafından girilen çalışma frekans aralığı kontrol edilerek  $L_n - Q_e$  çiftleri arasından en uygun değer yapılan yinelemeli işlem sonucunda hesaplanır.

$L_n - Q_e$  değerleri belirlendikten sonra, Denklem 8, 9, 10'da gösterildiği gibi rezonans tank elemanları  $L_r$ ,  $C_r$  ve  $L_m$  hesaplanır.

$$C_r = \frac{1}{2\pi \times Q_e \times f_o \times R_e} \quad 8$$

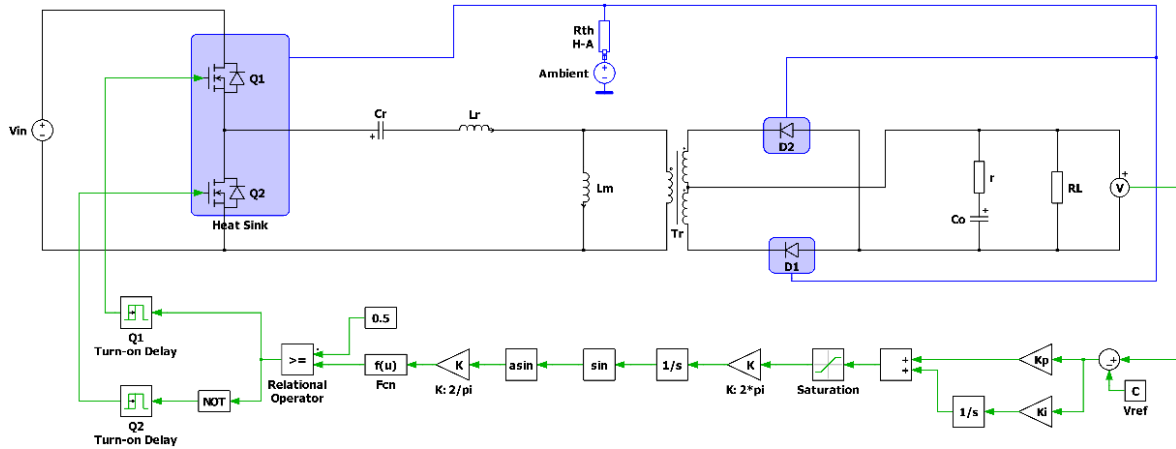
$$L_r = \frac{1}{(2\pi \times f_o)^2 C_r} \quad 9$$

$$L_m = L_n \times L_r \quad 10$$

$$R_e = \frac{8 n^2 V_o^2}{\pi^2 P_o} \quad 11$$

Rezonans tank parametreleri de belirlendikten sonra Şekil 5'te gösterilen MOSFET, transformatör, doğrultucu diyot ve çıkış kondansatörü parametreleri hesaplanarak arayüz üzerinde gösterilir.

#### 4. BENZETİM ÇALIŞMASI SONUÇLARI (SIMULATION RESULTS)



Şekil 7. PLECS Programında Hazırlanan LLC Rezonans Dönüştürücü Devresi

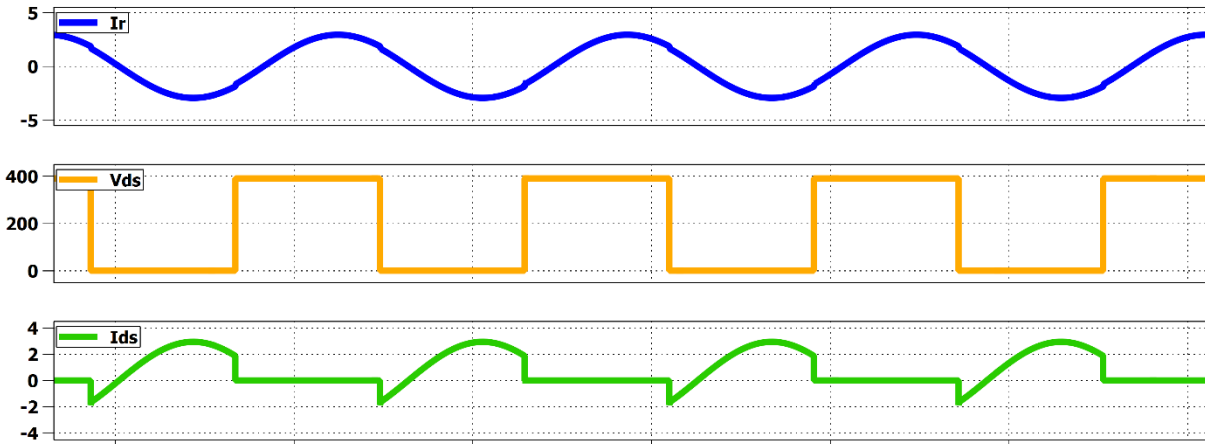
Tasarlanan arayüz çıktıları, PLECS programında hazırlanan benzetimler ile doğrulanmıştır. PLECS, güç kaynakları ve güç dönüştürücüleri gibi güç elektroniği sistemlerinin yüksek hızlı benzetimlerini ve modellemelerini hazırlamak için tercih edilen bir programdır. Arayüzün farklı güç seviyeleri için güvenilir sonuçlar verdiğini test edebilmek adına 192W, 300W ve 600W çıkış güçlerinde 3 farklı benzetim hazırlanmıştır. Sonuçların kıyaslanabilmesi için bu 3 farklı güç seviyesinde hazırlanan örnekler literatürden seçilmiştir [15], [16], [21]. Şekil 7'de PLECS programı ile hazırlanan LLC rezonans dönüştürücü çizimi verilmiştir. Benzetimlerde kullanılan devre elemanları ve değerleri ise Tablo 1'de yer almaktadır. Tablo 1 istenen dönüştürücü özelliklerini ve arayüz ile hesaplanan temel parametreleri içermektedir. Değişen giriş gerilimi ve yük durumlarında çıkış gerilimini düzenlemek için değişken frekans kontrol yöntemi kullanılmıştır. Yapılan benzetim çalışmalarında verim hesaplamalarının gerçek koşullara uygun sonuçlar verebilmesi için PLECS programının ısı modelleme özelliği kullanılmıştır. Seçilen MOSFET ve diyotların veri sayfalarında yer alan bilgiler ısı modeline işlenerek hesaplamalar yapılmıştır.

**Tablo 1.** Benzetimlerde Kullanılan Devre Parametreleri

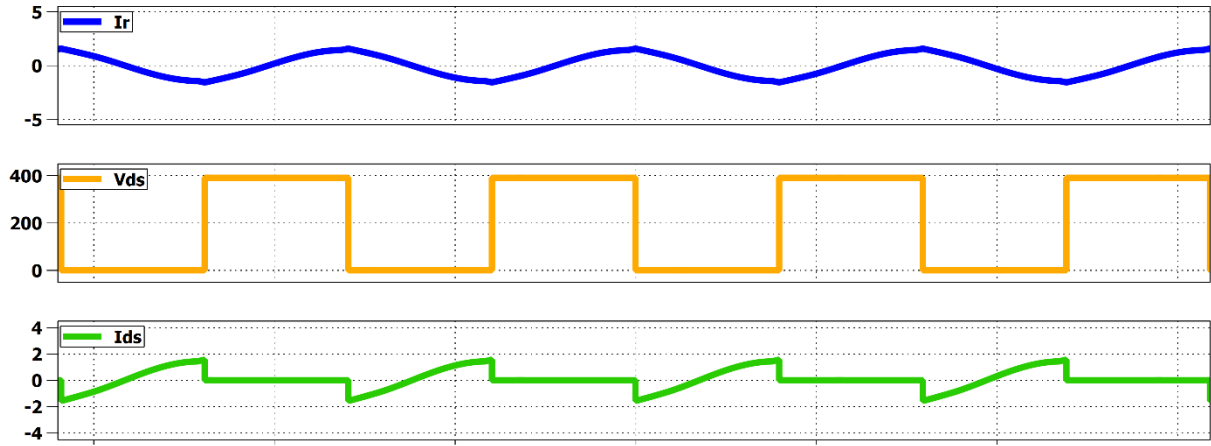
	192 W	300 W	600 W
$V_{in}$	350-400 V	375-405 V	350-410 V
$V_o$	24 V	12 V	12 V
$P_o$	192 W	300 W	600 W
$f_0$	100 kHz	120 kHz	150 kHz
$f_{sw}$	75 – 103 kHz	71 – 123 kHz	91 – 158 kHz
$n$	8	16	16
$L_m$	310 $\mu$ H	250 $\mu$ H	90 $\mu$ H
$L_r$	155 $\mu$ H	50 $\mu$ H	20 $\mu$ H
$C_r$	17 nF	37 nF	57 nF
$Q_1$ - $Q_2$	IPW60R280P6	IPW60R280P6	IPW60R280P6
$D_1$ - $D_2$	STPS5L60	STPS15L25D/G	VS-100BGQ030HF4

Hazırlanan benzetimler tam yükten, %10 yüke kadar farklı yük koşullarında denenmiştir. Farklı yük koşulları için rezonans kondansatör ve endüktör gerilim dalga şekilleri, tank akımı gerilim dalga şekli, transformatör giriş-çıkış gerilim dalga şekli ve diyotlar üzerindeki gerilim ve akım dalga şekilleri incelenmiştir. Şekil 8’de 300W çıkış gücünde yapılan benzetimden elde edilen tam yük ve %10 yük koşulları için rezonans akım ile  $Q_2$  MOSFET drain-source akım ve gerilim dalga şekilleri verilmiştir. Görüldüğü üzere iki yük koşulu için de MOSFET açılırken, drain-source akımı negatiftir. Bu gövde diyotunun iletimde olduğu ve SGA’nın sağlandığı anlamına gelir. Bu örnekte olduğu gibi diğer iki güç seviyesi için de incelemeler yapılmış ve tüm benzetimlerde MOSFET’lerin geniş bir yük aralığında SGA ile iletme girdiği görülmüştür.

Makalenin ikinci bölümünde anlatıldığı gibi sıfır gerilim anahtarlama (SGA), kazanç eğrilerinin her noktasında sağlanamamaktadır. Bu nedenle hazırlanan arayüz ile maksimum ve minimum kazanç eğrileri bu durum göz önüne alınarak hesaplanmaktadır. Kazanç eğrileri, kalite çarpanı ( $Q_e$ ) ve endüktans oranına ( $L_n$ ) bağlı olduğu için arayüz, en uygun  $L_n - Q_e$  değerini yapılan yinelemeli işlemler sonucunda hesaplar. Benzetim sonuçları ile istenilen yük aralığında MOSFET’lerin SGA ile iletme girdiği görülmektedir. Bu durum arayüzün maksimum ve minimum kazanç değerlerini ve  $L_n - Q_e$  parametrelerini hedeflenen şekilde hesaplayabildiğini göstermektedir.



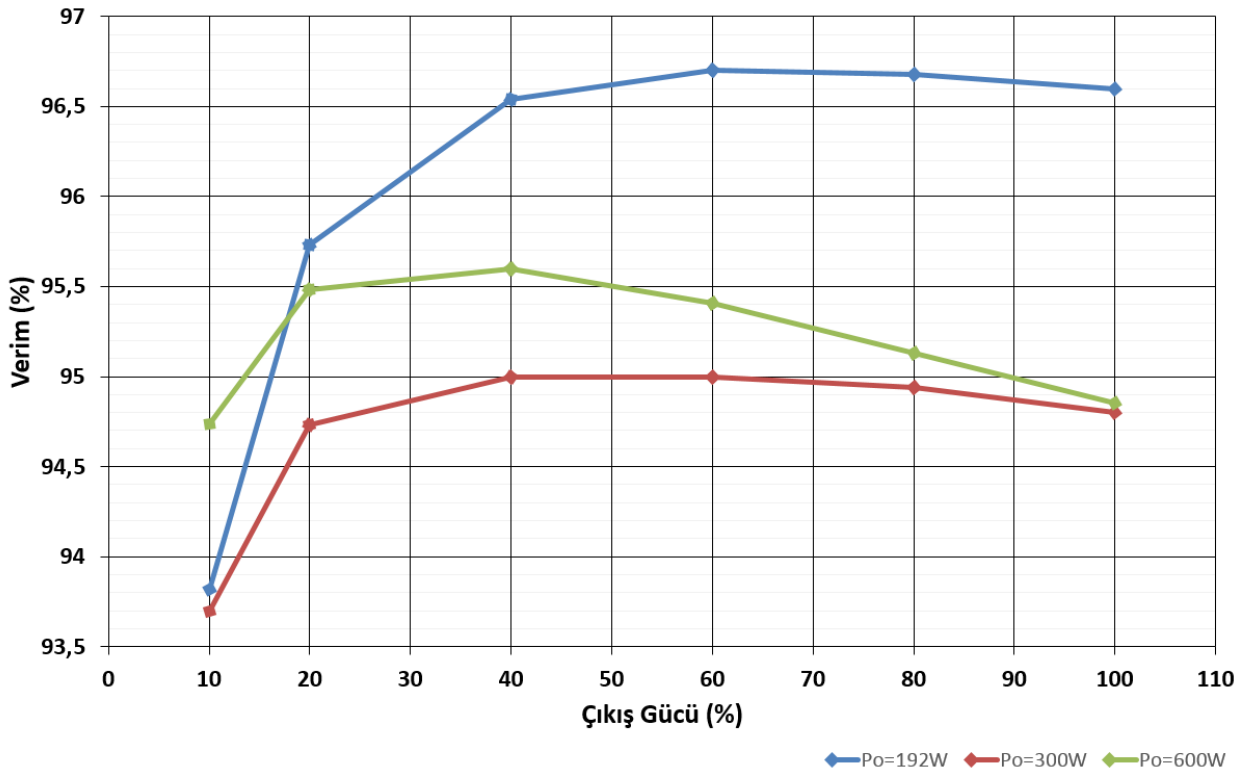
(a)



(b)

**Şekil 8.** Tam Yük ve %10 Yük Koşullarında Rezonans Akım Dalga Şekli ve MOSFET Gerilim, Akım Dalga Şekli. (a) Tam Yük Koşulu (b) %10 Yük Koşulu

Şekil 9’da sırasıyla 192W, 300W ve 600W çıkış gücü ile yapılan çalışmalar için farklı yük koşullarında elde edilen verim hesaplamaları verilmiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde üç farklı çıkış gücü için elde edilen maksimum verimin %95 ile %97 arasında değiştiği görülmektedir. Hedeflenen yük aralığı için primer taraftaki MOSFET’lerin SGA altında çalıştığının görülmesi ve elde edilen yüksek verim sonuçları, LLC rezonans dönüştürücünün en önemli avantajlarından biri olan yüksek verimliliğin, çalışma frekans aralığını endüktif bölgede tutacak şekilde yapılacak bir tasarım ile sağlanabildiğini göstermektedir. Tablo 1’de arayüz ile hesaplanan rezonans frekans  $f_0$  ve hesaplanan çalışma frekans aralığı  $f_{sw}$  ile verilmiştir. Şekil 9’da görüldüğü gibi istenilen çalışma aralığında tüm benzetim sonuçlarında %93 üzerinde verim elde edilmiş olması arayüz ile hesaplanan çalışma frekans aralığının rezonans frekans civarında ve hedeflenen bölgede olduğunu göstermektedir.



**Şekil 9.** Hazırlanan Benzetimlerden Elde Edilen Verim Sonuçları

## 5. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışma kapsamında FHA analiz metodu kullanılarak yüksek verim elde etmeyi hedefleyen bir LLC rezonans dönüştürücü tasarım yaklaşımı ele alınmıştır. Ele alınan bu yaklaşım ile MATLAB programı kullanılarak, kullanıcıya tasarlanması hedeflenen LLC rezonans dönüştürücü için gerekli olan parametreleri sunan bir arayüz hazırlanmıştır. Bu arayüzü doğrulayabilmek için PLECS programı kullanılarak 192W, 300W ve 600W çıkış güçlerinde üç benzetim hazırlanmıştır. Elde edilen sonuçlar değerlendirilerek üç güç seviyesi için geniş bir yük aralığında dönüştürücülerin sıfır gerilim anahtarlama ile çalıştığı gözlenmiştir. Yine elde edilen sonuçlar incelendiğinde üç farklı çıkış gücü için elde edilen maksimum verimin %95 ile %97 arasında değiştiği görülmüştür. Yapılan bu değerlendirmeler hazırlanan arayüzün tutarlı sonuçlar ortaya çıkardığını göstermiştir.

Yapılan çalışma ile literatürde daha önce ele alınmayan bir arayüz tasarımı geliştirilmiştir. Geliştirilen bu arayüzün LLC rezonans dönüştürücü tasarım ve optimizasyon süresini kısaltacağı ve devre elemanlarının seçimi konusunda kullanıcılara büyük kolaylık sağlayacağı düşünülmektedir. Bu sayede arayüzün, LLC rezonans dönüştürücü topolojisi kullanımının yaygınlaşmasına katkı sağlaması hedeflenmektedir. Gelecekte bu çalışma kapsamında hazırlanan benzetimlerin laboratuvar ortamında yapılacak deneysel çalışmalar ile desteklenmesi, geliştirilen arayüzün güvenilirliğini arttıracaktır. Ayrıca arayüz farklı kontrol algoritmalarının denenebileceği biçimde geliştirilebilir.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] M. S. M. Almardy "Three-Phase High-Frequency Transformer Isolated Soft-Switching DC DC Resonant Converters", Ph.D. Dissertation, University of Victoria, 2011.
- [2] N. E. Topuz "Design and Implementation of LLC Resonant Converter and High Frequency Transformer", Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Haziran 2019.
- [3] Y. Gu, Z. Lu, L. Hang, Z. Qian, G. Huang "Three-Level LLC Series Resonant DC/DC Converter", IEEE Transactions On Power Electronics, 20(4), 781-789, July 2005, 10.1109/TPEL.2005.850921.
- [4] S. Üçer "Seri Rezonans DA/DA Çeviricisinin Analiz, Tasarım Ve Gerçeklenmesi", Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Temmuz 2001.
- [5] A. Awasthi "Analysis, Design & Control of Low-Q LLC DC-DC Resonant Converter for Wide Input Voltage and Load Range Applications", Master Thesis, Queen's University, September 2019.
- [6] D. Huang, F. C. Lee, D. Fu "Classification and Selection Methodology for Multi-Element Resonant Converters", IEEE, Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2011, 10.1109/APEC.2011.5744651.
- [7] X. Tan, X. Ruan "Equivalence Relations of Resonant Tanks: A New Perspective for Selection and Design of Resonant Converters", IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 10.1109/TIE.2015.2506151.
- [8] L. Rossetto, G. Spiazzi "Series Resonant Converter with Wide Load Range" IEEE Industry Applications Conference, Thirty-Third IAS Annual Meeting, 1326-1331, 1998, 10.1109/IAS.1998.730316.
- [9] P. Jain "A Novel Frequency Domain Modelling of a Series Resonant DC/DC Converter" 12th International Conference on Telecommunications Energy, 343-350, 1990, 10.1109/INTLEC.1990.171270.
- [10] A. K. S. Bhat, M. M. Swamy "Analysis and Design of a High Frequency Parallel Resonant Converter Operating Above Resonance" 3rd Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 182- 189, 1988, 10.1109/APEC.1988.10565.

- [11] A. Pawellek, C. Oeder, T. Duerbaum “Comparison of Resonant LLC and LCC Converters for Low-Profile Applications”
- [12] R. L. Steigerwald “A Comparison of Half-Bridge Resonant Converter Topologies”, IEEE Transactions on Power Electronics, 3(2), 174–182, April 1988, 10.1109/63.4347.
- [13] B. C. S. Cheng “Modelling and Control of the LLC Resonant Converter”, Master Thesis, The University of British Columbia, December 2012.
- [14] C. Fei “Optimization of LLC Resonant Converters: State-trajectory Control and PCB based Magnetics”, Ph.D. Dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University, March 2018.
- [15] H. Huang “Designing an LLC Resonant Half-Bridge Power Converter”, Power Supply Design Seminar, 2010, Retrieved from power.ti.com/seminars
- [16] Fairchild semiconductor corporation “Half-Bridge LLC Resonant Converter Using FSFR-Series Fairchild Power Switch (FPS)”, Application Note, 2014.
- [17] S. A. Rahman “Resonant LLC Converter: Operation and Design 250W 33Vin 400Vout Design Example”, Infineon Technologies, Application Note, 2012.
- [18] B. Lu, W. Liu, Y. Liang, F. C. Lee, J. D. Van Wyk “Optimal Design Methodology for LLC Resonant Converter”, Twenty-First Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2006, 10.1109/APEC.2006.1620590.
- [19] S. Çetin “Veri Merkezi Uygulamaları için Yüksek Verimli Bir LLC Rezonanslı DC-DC Dönüştürücü Tasarımı”, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi PART C: Tasarım ve Teknoloji, 5(1), 45-54, 2017.
- [20] W. Feng “State-Trajectory Analysis and Control of LLC Resonant Converters”, Ph.D. Dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University, March 2013.
- [21] F. D. Domenico, A. Steiner, J. Catly “Design of a 600 W HB LLC Converter Using 600 V C o o l M O S P 6”, Infineon Technologies, Application Note, 2015.

## Fast Charging Station Technologies For Electric Vehicles

 Alper KEREM\*  Hatice GÜRBAK 

 Kahramanmaraş Sütçü İmam University, Engineering and Architecture Faculty, Department of Electrical Electronics Engineering, ,  
 Kahramanmaraş/TURKEY

### Graphical/Tabular Abstract

#### Article Info:

Research article

Received: 01/04/2020

Revision: 13/07/2020

Accepted: 08/08/2020

#### Highlights

- EV Charging
- Fast Charging Stations

#### Keywords

 Electric Vehicles  
 Charging Stations  
 Bidirectional Topology  
 Unidirectional Topology

Electric vehicle (EV) technology is a new technology aiming to reduce fossil fuel usages. This new technology has some problems including battery charging time and range. One of the problems, battery charging times (level 1 level 2, level 3, and level 4), was investigated in this study. While level 1 and level 2 refer to methods of slow charging, level 3 and level 4 refer to fast charging. Fast charging methods consist of three different topologies: topology with AC/ DC/ DC converters (vehicle-to-grid (V2G) charging stations and one-way charging stations as their sub-branches), common AC-connected multi-point topology and transformerless topologies.

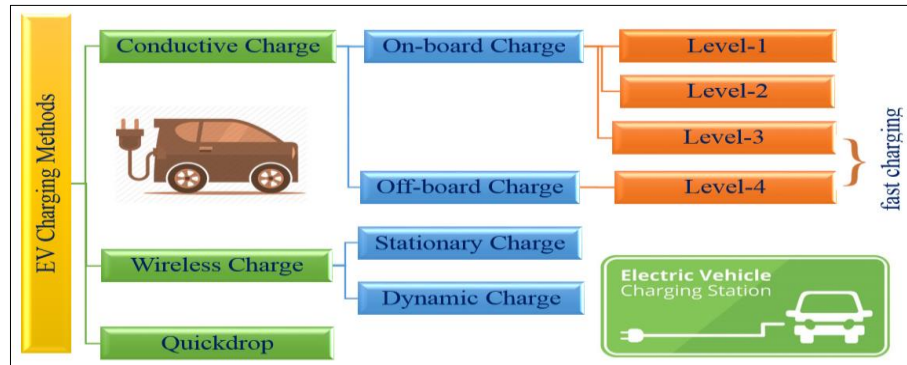


Figure A. EV Charging Methods

Among these topologies, it was concluded that the V2G method is an effective and reliable method in terms of adaptation to renewable energy sources, energy efficient use, easy installation and adaptation to both AC and DC systems.

**Purpose:** It is aimed to determine fastest and the most efficient charging method for EV's. Hence the layout, functionality and importance of EV charging stations have been investigated.

**Theory and Methods:** Topologies of EV charging stations were analyzed and compared in literature from various perspectives. In addition, tables were created to detect variations between charging levels and charging rates.

**Results:** Fast charging stations have been observed to be vital for EV's to adapt to future technologies. The V2G fast charging topology has been observed to have a high energy efficiency and can operate in accordance with other renewable energy sources.

**Conclusion:** Some fast charging stations are viewed as a threat to the electricity grids as having a charging capacity at MW levels. Among the steps that can be taken against this challenge are to reduce the problems caused by the demand for electricity, to preserve the charging station's common link point voltage and to send reactive power to the grid to avoid voltage instability. Another precaution is to use the V2G fast charging method. These stations must also be built in compliance with IEC requirements in terms of user/ network protection, device reliability and energy efficiency.

GU J Sci, Part C, 8(3): 644-661 (2020)



Gazi Üniversitesi

**Fen Bilimleri Dergisi**  
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ


<http://dergipark.gov.tr/gujsc>

## Elektrikli Araçlar İçin Hızlı Şarj İstasyonu Teknolojileri

Alper KEREM\* Hatice GÜRBAK

Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü,  
Kahramanmaraş/TÜRKİYE

### Öz

Tüm dünyada gündün güne gelişen teknoloji ve artan dünya nüfusu beraberinde enerji kaynağı sorununu doğurmaktadır. Fosil kaynaklı yakıtların doğada sınırlı miktarda rezervlerinin bulunması, yüksek maliyetleri ve çevreye verdikleri tahribatlar nedeniyle yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelim hız kazanmıştır. Fosil kaynaklı yakıtların başlıca kullanım alanlardan biri içten yanmalı motorlara sahip araçlardır. İçten yanmalı motora sahip araçlar yerine sadece elektrik motoru kullanılan elektrikli araçlar (EA) bu fosil kaynaklı yakıt tüketimini azaltmaya yönelik yeni bir teknolojidir. Bu teknolojinin ise menzil ve batarya şarj süresi gibi bazı problemleri mevcuttur. Bu çalışmada problemlerden biri olan batarya şarj süreleri (seviye 1, seviye 2, seviye 3 ve seviye 4) üzerine araştırmalar yapılmıştır. Seviye 1 ve seviye 2 yavaş şarj yöntemlerini ifade ederken, seviye 3 ve seviye 4 hızlı şarj yöntemlerini ifade etmektedir. Hızlı şarj yöntemleri ise AA/DA/DA dönüştürücülü topoloji (alt dalları olarak araçtan şebekeye (V2G) şarj istasyonu ve tek yönlü şarj istasyonu), ortak AA bağlantılı çok noktalı topoloji ve transformatörsüz topoloji olmak üzere üç farklı topolojiden oluşmaktadır. Tüm bu topolojiler arasında yenilenebilir enerji kaynaklarına uyum sağlaması, enerjiyi verimli kullanması, kolay kurulumu ve hem AA hem DA sistemlerine uyum sağlaması açısından V2G yönteminin verimli ve etkili bir yöntem olduğu sonucuna varılmıştır.

### Makale Bilgisi

Araştırma makalesi  
Başvuru: 01/04/2020  
Düzeltilme: 13/07/2020  
Kabul: 08/08/2020

### Anahtar Kelimeler

Elektrikli Araçlar  
Şarj İstasyonları  
Şarj Seviyeleri  
Hızlı Şarj İstasyonu  
Topolojileri

### Keywords

Electric Vehicles  
Charge Stations  
Charge Levels  
Fast Charging Station  
Topologies

## Fast Charging Station Technologies For Electric Vehicles

### Abstract

Increasing world population and developing day-to-day technology are causing the energy supply crisis around the world. Owing to the limited nature reserves, high costs and destruction of fossil fuels to the ecosystem, movements towards renewable energy sources have been accelerated. It is one of the fossil fuel's main uses are vehicles that have internal combustion engines. Instead of vehicles using an internal combustion engine, electric vehicles (EV), which only use electric motors, are a new technology to reduce the consumption of fossil fuel. There are some difficulties with this new technology, such as range and battery charge time. In this study, the research on battery charging time (level 1, level 2, level 3, and level 4) was conducted which is one of the problems. Level 1 and level 2 refer to slow charging methods while level 3 and level 4 refer to fast charging methods. Fast charging methods consist of three different topologies: AC/ DC/ DC converter topology (as sub-branches of vehicle-to-grid (V2G) charging station and one-way charging station), common AC connected multi-point topology and transformerless topology. It was concluded that the V2G method which is the sub-branch of fast charging station topology of AC/ DC/ DC converter, is an effective and reliable process for adapting to renewable energy sources, using energy efficiently, easily integrated and adapting to both AC and DC systems.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Taşımacılık sektörü, fosil kökenli yakıt tüketiminin en fazla olduğu ve çevre üzerinde zararlı etkileri olan bir sektördür. Bu doğrultuda, EA'lar fosil kökenli yakıt tüketimini azaltarak [1], ülkelerin enerji konusundaki dışa bağımlılıklarını azaltmak ve çevreye salınan zararlı gazlar sebebiyle iklim değişikliğinin üstesinden gelebilmek için büyük bir etken olarak görülmektedir [2].



EA'ların ticari başarısının en büyük etkenlerinden biri yüksek verimli şarj istasyonlarıdır [3]. Fakat, EA sayısının artmasına rağmen şarj istasyonu alt yapısının eksikliği ve uzun şarj süreleri bu araçların kullanımını günlük gidiş geliş ve kısa mesafeli yolculuklarla sınırlandırmaktadır [4]. Oysaki, hızlı şarj istasyonlarının tasarlanması ve kurulumu EA'ların kullanımını yaygınlaştırmak için önemli bir adım olacaktır. Bu şarj istasyonları ile şarj süreleri kısalarak zamandan tasarruf sağlanmış olunacaktır. Günümüzde EA'yı yaklaşık 1s içinde şarj edebilen 50kW hızlı şarj cihazları ve 10dk içinde şarj edebilen 240kW çok hızlı şarj cihazları tasarlanmıştır. Bu yüksek güçlü ve hızlı şarj cihazlarının yakın gelecekte piyasaya sürülmesi beklenilmektedir [5]. Ayrıca, şarj istasyonu cihazları, alt yapı bağlantıları ve iletişim protokollerinin standart hale getirilmesiyle kullanıcılara kaliteli ve hızlı bir şarj süresi sağlanacaktır. Bu durum mevcut EA sistemini daha verimli hale getirerek dünya genelinde yaygın kullanılmasına yardımcı olacaktır. Bazı ülkeler şarj istasyonlarının geliştirilmesi ve yaygın kullanımı için çeşitli uluslararası standartlar geliştirmiştir [1]. Ülkelere göre EA standartları Tablo 1'de gösterilmektedir.

**Tablo 1.** Ülkelere göre EA Standartları [6]

EA sistemi	Ülke
Otomotiv Mühendisleri Topluluğu (Society of Automotive Engineers (SAE))	Amerika Birleşik Devletleri
Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (International Electrotechnical Commission (IEC))	Avrupa
Japon Elektroteknik Komitesi (Japanese Electrotechnical Committee (JEC))	Japonya
Çin Elektrik Konseyi (China Electricity Council (CEC))	Çin

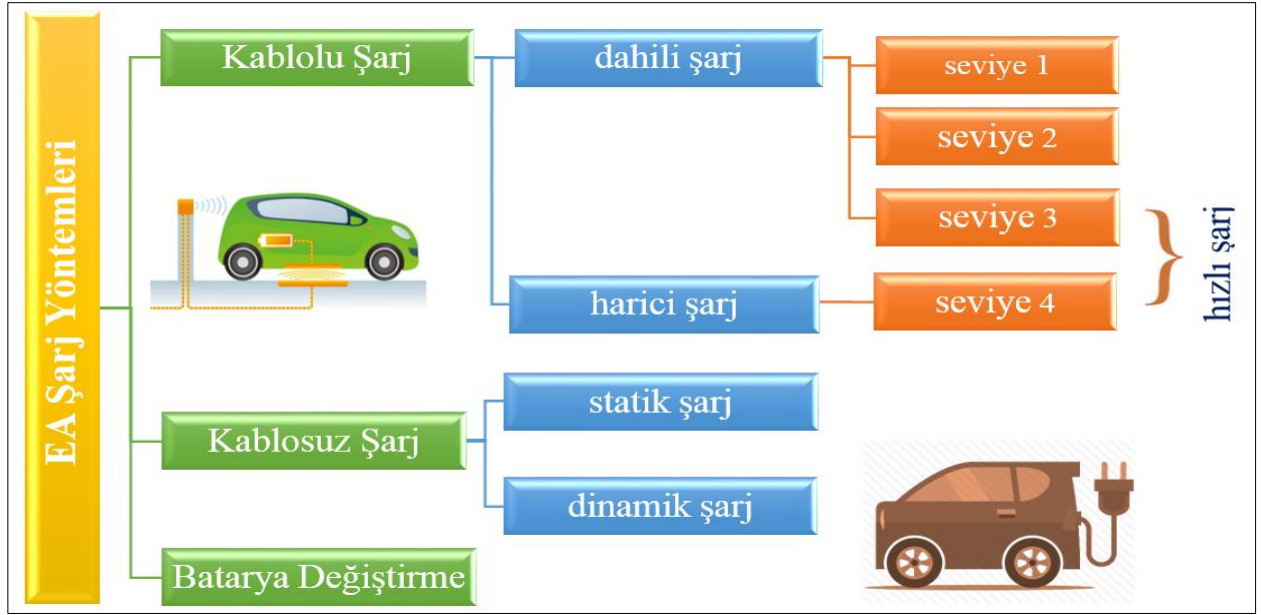
Hızlı şarj istasyonu ile ilgili literatür çalışmaları incelendiğinde Angelov ve ark. ları [7] EA'lar için batarya, güç dönüştürücüsü ve kontrol ünitesinden oluşan yeni bir şarj modeli tasarlamışlardır. Çalışmayı diğer çalışmalardan önemli yönü aşırı şarjı önlemek için 25V ve 400V sınırlama katsayısına sahip orantılı bir P-regülatörlü kontrol ünitesi içermesidir. Bu çalışmada aşırı şarj durumunu kontrol ederek batarya kullanım ömrünü uzatmayı hedeflemişlerdir. Sistem hem hızlandırılmış şarj işleminde hem de normal şarj işleminde test edilerek oransal regülatör ile modelin kolayca gerçekleştirilmesini sağlamıştır. Kai Struz ve ark. ları [8] Almanya'da yeni bir hızlı (DA) şarj istasyonu modellemişlerdir. Bu model V2G ve reaktif güç dengelemesini sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. 10 adet EA kapasiteli 1MW gücündeki şarj istasyonunu gerçek parametreler ile simüle ederek 1'den fazla EA'ın hızlı (DA) şarj edilmesinin mümkün olduğunu göstermişlerdir. EA şarj istasyonlarının yenilenebilir enerji kaynaklarına entegrasyonu üzerine Sahoo ve ark. ları [9] güneş enerjisini EA hızlı şarj istasyonlarında ZVSPWM kontrollü tam köprülü DA/DA dönüştürücü kullanarak şarj istasyonuna entegre etmişlerdir. Çalışmayı Simulink ortamında 0,5kW ve 48V'luk bir sistem için simüle etmişlerdir. Dominguez-Navarro ve ark. ları [10] hızlı şarj istasyonlarının şebekeden talep ettiği yüksek enerjiyi azaltmak için modellerine yenilenebilir enerji (rüzgar ve fotovoltaik) kaynağı ve depolama sistemini eklemişlerdir. Bu çalışmada diğer çalışmalardan farklı olarak EA'ların varış saatini ve şarj durumunu dikkate alan bir modeli de kullanmışlardır. Tasarımda genetik algoritma (GA) ile hızlı şarj istasyonunun kurulumunu ve çalışmasını optimize etmişlerdir. Bugünkü değeri ile ölçülen kârı en üst düzeye çıkaran optimum çözümü bulmaya çalışmışlardır. EA şarj istasyonunun şebeke üzerinde olumsuz etkileri konusunda Geske ve ark. [11] Magdeburg'un güç sistemi dağıtım şebekesinde EA'ların şarj simülasyonunu modellemişlerdir. Şarj işlemleri için farklı senaryolar oluşturularak araçların gidiş ve gelişlerini gerçek zamanlı verilere dayandırmışlardır. Dağıtım şebekesinin her bir düğümündeki gerilim kararlılığını araştırarak üretilen senaryoların gerilim kararsızlığına neden olmadığı sonucuna varmışlardır. Nikitha ve ark. [12] 200MVA, 13,8kV ve 50Hz'lik bir elektrik şebekesine farklı sayıda EA şarj istasyonunun bağlı olduğu durumdaki toplam harmonik bozunum (THB) dalgalanmalarını simüle etmişlerdir. Bu simülasyonu şebekeye hiçbir EA şarj istasyonu bağlı değil iken, şebekeye toplam 5MW'lık bir EA şarj istasyonu bağlı iken ve şebekeye toplam 70MW'lık bir EA şarj istasyonu bağlı iken THB ve giriş güç faktörü düzeylerini ayrı ayrı hesaplanmışlardır. Taban yük ve tepe yük durumlarında şarj olurken güç sistemine artan sayıda şarj istasyonu bağlandıkça giriş güç faktörü seviyelerinin kademeli olarak düştüğünü gözlemlemişlerdir. EA şarj istasyonunun şarj süresi konusunda Shaarbaf [13] Q-Learning'e dayalı akıllı şebekeye bağlı hızlı şarj istasyonunda EA'ların en iyi şarj süresinin belirlenmesi konusunda çalışmıştır. Hızlı şarj istasyonlarındaki en iyi şarj süresini belirlemek için takviye öğrenme yöntemi

kullanarak yeni bir yöntem geliştirmiştir. Önerilen yöntemde şarj sırası bekleme süresi, araç sahipleri tarafından ödenen enerji maliyetleri ve istasyon sahiplerinin karı için en iyi şarj saatlerini belirlemek gibi önemli parametreleri incelemiştir. Bu yöntemle istasyon sahiplenme durumunun %4 arttığını ve sırada bekleme sürelerine göre %10'dan %40'a kadar tasarruf edildiğini göstermiştir. Malik ve Lehtonen [14] hızlı şarj istasyonlarında EA'ların bekleme süresini en aza indirmeyi amaçlamışlardır. EA'ların şarj oranını kontrol etmek için şarj gücünü hızlı şarj istasyonundaki her bir sokete tahsis etmeye yönelik bir algoritma tasarlamışlardır. Kullanılabilir ağ kapasitesi, şarj istasyonundaki şarj soketi sayısı ve EA'ların sırada bekleme süresi arasındaki ilişkileri analiz etmişlerdir. Sadeghi-Barzani ve ark. ları [15] EA şarj istasyonlarından daha yüksek verim elde etmek için doğru lokasyona yerleştirilmeleri ve lokasyon seçimi konusunda model geliştirmişlerdir. Çalışmalarında hızlı şarj istasyonlarının en uygun şekilde yerleştirilmesi ve boyutlandırılması için karmaşık tamsayı doğrusal olmayan (MINLP) optimizasyon yaklaşımı kullanmışlardır. Yaklaşımındaki faktörler arasında istasyon geliştirme maliyeti, EA enerji kaybı, transformatör konumları ve kentsel yolların konumları yer almıştır. Model kentsel yolları dikkate alarak şarj istasyonu geliştirme maliyetini en aza indirmek için şarj istasyonlarının en uygun yerini ve boyutlarını bulmaya çalışmıştır. Victor-Gallardo ve ark.ları [16] yeni bir hızlı bir şarj istasyonu modeli geliştirmişlerdir. Modeli oluştururken optimizasyon verilerinin eksik olduğu, hizmet talebinin ise fazla olduğu yerlerde daha düşük maliyetler ile EA'ların yaygınlaşmasını hızlandırmayı amaçlamışlardır. Şehirlerde hızlı şarj istasyonu temin etmeyi ve konumların fizibilitesini incelerken uzak yerleri birbirine bağlayan güzergahlarda konumlandırılmalarını dikkate almışlardır.

Bu çalışmada hızlı şarj istasyonu teknolojisindeki gelişmeleri derlemek için dünya genelindeki tasarımlar araştırılmıştır. Hızlı şarj kavramının daha iyi anlaşılabilmesi için bölüm 2'de şarj istasyonları ve şarj yöntemleriyle ilgili bilgilere yer verilmiştir. Şarj yöntemlerinin kablolu şarj yöntemi, kablosuz (endüktif) şarj yöntemi ve batarya değiştirme yöntemi olarak üç ana başlık altında toplandığı, bu yöntemlerin kendi içlerinde sırasıyla dahili şarj yöntemi ve harici şarj yöntemi olarak; statik şarj yöntemi ve dinamik şarj yöntemi olarak alt başlıklara ayrıldığı anlatılmıştır. Dahili şarj yönteminin seviye 1, seviye 2 ve seviye 3 olarak; harici şarj yönteminin ise seviye 4 olarak ifade edildiğine değinilmiştir. Bu modellerden seviye 1 ve seviye 2'nin yavaş şarj yöntemleri olduğu; seviye 3 ve seviye 4'ün ise hızlı şarj yöntemleri olduğu ifade edilmiştir. Bölüm 3'te hızlı şarj yöntemleri olan seviye 3 ve seviye 4 detaylıca anlatılmıştır. Bu şarj istasyonu modelleri AA/DA/DA topolojisi, ortak AA bağlantılı çok noktalı topoloji ve transformatörsüz topoloji olarak üç topolojiye ayrılmıştır. Bu topolojilerden AA/DA/DA topolojisinin yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını artırmasıyla dağıtım şebekesi üzerinde oluşan olumsuz etkileri büyük oranda azalttığına değinilmiştir. Bu topolojinin V2G şarj istasyonu ve tek yönlü şarj istasyonu olarak iki alt başlığa ayrıldığı anlatılmıştır. Ortak AA bağlantılı çok noktalı topolojinin uygulama açısından daha kolay kurulumu olduğu ve aynı anda birden fazla EA'yı hızlı bir şekilde şarj etme imkanı sunduğu anlatılmıştır. Transformatörsüz topolojinin ise gerilim seviyesini düşürmek için transformatör kullanmaya gerek duymadığı ve böylece transformatör kayıplarının olmadığı bir topoloji olduğuna değinilmiştir.

## 2. ŞARJ YÖNTEMLERİ (CHARGING METHODS)

EA'lar için kablolu şarj, kablosuz (endüktif) şarj ve batarya değişimi olmak üzere üç farklı şarj yöntemi vardır [1]. Bu yöntemler Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. EA Şarj Yöntemleri

## 2.1. Kablolu Şarj Yöntemi (Conductive Charging Methods)

Şarj cihazı, güç kaynağı ve araç arasında doğrudan temasın olduğu bir şarj sistemidir [17]. Bu şarj sistemi çeşitli güç faktörü düzeltmeli doğrultucu ve konnektörden oluşmaktadır. Dahili ve harici şarj yöntemleri olarak ikiye ayrılmaktadır.

### 2.1.1. Dahili şarj yöntemi (On-board Charging Methods)

Araç içinde doğrultucu ve batarya grubu içerirken şarj cihazını araç dışında bulduran bir yöntemdir [7]. Bu yöntemdeki şarj seviyesi şarj çıkışının güç seviyesi olarak ifade edilmektedir [18]. Güç seviyesi şarj işleminin uzunluğunu belirleyen önemli bir parametredir. Seviye 1, seviye 2, seviye 3 ve seviye 4 olmak üzere dört şarj seviyesi vardır. Şarj seviyesi EA ve şarj istasyonu arasındaki güvenli iletişim protokolünü [1] ve araçlar ile şarj istasyonları arasındaki iletişim seviyesini [19, 20] içermektedir.

Seviye 1: Şarj işleminin herhangi bir güvenlik önlemi alınmadan basit bir uzatma kablosu ve standart bir priz ile gerçekleştirilmesidir [7]. EA'ların bu yöntemde konutlarda veya iş yerlerinde park halindeyken uzun süre şarj edilme imkanları bulunmaktadır. Bu nedenle yavaş şarj yöntemi olarak da bilinmektedir [21]. Bu şarj istasyonu yalnızca AA şarj istasyonudur ve bataryanın enerji kapasitesine bağlı olarak yaklaşık 8 ila 10 saatte şarj edebilmektedir [7]. Bu istasyonlar IEC 62196 standardına göre topraklama gerektirmektedir ve 16A 250V (tek faz) ve 480V (üç faz) olarak sınırlandırılmıştır [22]. Ayrıca, bu istasyonların kurulumu elektrik tesisatı güvenlik yönetmeliklerine uygun şekilde projelendirilmeli, aşırı yükten korumak için topraklama sistemi içermeli, devre kesiciler ve toprak kaçağının korunma önlemlerine sahip olmalıdır [23].

Seviye 2: Bu yöntemde araçlar ev prizleriyle ana güç şebekesine bağlanmaktadır [1]. Şarj işlemi tek fazlı/üç fazlı bir şebeke ve topraklama hattı ile gerçekleştirilmektedir. AA güç kaynağı hattı 32A'yı aşmamalı, 250V AA (tek faz) veya 480V AA'yı geçmemelidir [18]. Kontrol kutusu EA'nın batarya sisteminden veya fişten 0,3m uzakta olacak şekilde yerleştirilmelidir. Bu yöntem şehirlerarası yollar ve otopanlar hariç havaalanlarından üniversitelere kadar kurulmasında sakınca olmayan bir modeldir [21]. Bu yöntemdeki şarj süresi seviye 1 şarj etme süresinin yarısından daha azdır [7]. Bu istasyonlar IEC 62196 standardına göre 32A 250V (tek faz) ve 480V (üç faz) olarak sınırlandırılmıştır [22].

Seviye 3: Kablolu bir AA şarj istasyonudur ve seviye 2'den daha yüksek bir güç seviyesine sahiptir. Güvenlik protokolü ise seviye 2 ile aynıdır [23]. Bu yöntemde batarya sistemindeki cihazları kontrol etmek için özel bir batarya kontrol sistemi kullanılarak EA AA güç kaynağına bağlanmaktadır [24]. Şarj seviyeleri Tablo 2'de verilmiştir.

**Tablo 2. Şarj Seviyeleri [1]**

Özellikler	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
Güç	1-3kW	7-43kW	50-250kW
Dolum süresi	3-10s (%80)	1-7s (%80)	30dk (%100)
Batarya tipi	Pb-acid, Ni-MH, Li-Ion	Ni-MH, Zebra, Li-Ion	Li-Ion
Konum	Müstakil evler, apartmanlar, özel mülkler, kamu alanları, park alanları	Müstakil evler, apartmanlar, özel mülkler, kamu alanları, park alanları, caddeler, bağlantı geçiş noktaları	Müstakil evler, apartmanlar, özel mülkler, kamu alanları, park alanları, caddeler, bağlantı geçiş noktaları, şehirler arası otobanlar, topluma açık alanlar

### 2.1.2. Harici Şarj Yöntemi (Off-board Charging Methods)

Seviye 4 olarak bilinen bu yöntemde EA'lar harici bir şarj cihazı ile ana güç şebekesine bağlanmaktadır [25]. Bu yöntem DA şarj yöntemidir ve şarj cihazı aracın dışındadır. Şarj cihazına bataryanın türü ve şarj durumu bilgilerini göndermek için iletişim bağlantısı vardır. Bataryaya 400A ve 500V DA'ya kadar yüksek gerilim sağlayabilmektedir. 20-30dk kadar kısa bir sürede şarj edebilen bu teknoloji SAE J1772 Combo standardı ve Japon CHAdeMO standardı tarafından yönetilmektedir. SAE J1772 Combo standardı maksimum gücü 100kW (500V DA'da 200A) olarak belirtirken, CHAdeMO standardı tarafından belirlenen maksimum şarj gücü ise 62kW (500V DA'da 125A)'dır. Bu tarz hızlı şarj istasyonları çok yüksek güç ve elektronik cihazlar gerektirmektedir [7].

### 2.2. Kablosuz (Endüktif) Şarj Yöntemi (Wireless Charging Methods)

Kablosuz şarj olarak da bilinen endüktif şarj EA bataryasına güç aktarmak için elektromanyetik dalgalar kullanılmaktadır [1]. Araç, zemine yerleştirilen şarj yuvasının üstüne park edildiğinde şarj işlemi kendiliğinden başlamaktadır [18]. Bu yöntemde gücü aktarmak için ana topraklama bobini (verici) ve ikincil bobin arasındaki hava boşluğunda değişken manyetik alan kullanılmaktadır [26]. Böylece şarj etme işlemi basitleştirilerek elektronik devrelerde oluşacak gürültü/ parazit vb gibi olumsuz etkiler azaltılarak [27] batarya ömrünün uzaması sağlanmaktadır. Bataryaya gönderilen AA güç bataryayı şarj etmek ve manyetik rezonans sisteminin verimliliğini artırmak için kullanılmaktadır [28]. Bu sistemin frekansı 20-100kHz arasında [1] değişmektedir ve sistemdeki dönüştürücü %90'a varan verimle çalışabilmektedir [17]. Kablosuz şarj yöntemi statik ve dinamik şarj yöntemi olarak ikiye ayrılmaktadır.

#### 2.2.1. Statik Şarj Yöntemi (Stationary Charging Methods)

Bu yöntem sabit şarj yöntemi olarak da bilinmektedir [29]. Şebeke gücünden yerleşik batarya girişine kadar ölçülen statik şarj cihazının sistem verimliliği %85-93 arasında değişmektedir. Fakat hava aralığının olduğu deneysel prototip sistemleri için verimlilik %95-98 olarak gözlenmiştir [30]. Birincil bobin, güç dönüştürücüleri ile zeminin altına monte edilmektedir. Alıcı bobin veya ikincil bobin normalde EA'ların ön, arka veya ortasının altına monte edilmektedir. Enerji, güç dönüştürücü kullanılarak AA'dan DA'ya dönüştürülür ve bataryaya aktarılır. Güç kontrolü ve batarya yönetim sistemleri herhangi bir güvenlik sorunundan kaçınmak ve birincil taraftan geri bildirim alabilmek için kablosuz iletişim ağına sahiptir. Şarj süresi şebeke gücüne, batarya boyutlarına ve iki sargı arasındaki hava boşluğu mesafesine bağlıdır. Bu şarj cihazı park alanlarına, otoparklara, evlere ve alışveriş merkezi vb. gibi yerlere kurulabilmektedir [29].

#### 2.2.2. Dinamik şarj yöntemi (Dynamic Charging Methods)

Hareket halindeki EA'ları şarj etmek için kullanılan bir yöntemdir. Menzili artırmak için EA'ların oldukça sık şarj edilmesi veya daha büyük bir batarya kullanmaları gerekir ki bu da maliyet ve ağırlık gibi ek

sorunlara yol açmaktadır. EA'yı sık sık şarj etmek ise ekonomik değildir. Bu yöntem EA'lardaki menzil ve maliyet ile ilgili bazı sorunları azaltabilecek bir teknolojidir [29]. Verici bobinlerinin ve güç kaynaklarının önceden belirlenmiş güzergahlara konumlandırılması gerekmektedir [31]. Buradaki temel problem ise elektromanyetik alan şiddetinin mesafe arttıkça azalmasıdır [32].

### 2.3. Batarya Değişirme Yöntemi (Quick Drop Methods)

Bu yöntem EA kullanıcılarının boş bataryalarını tamamen şarj edilmiş bir batarya ile değiştirebilecekleri bir yöntemdir [1]. Batarya şarj süresi saatler alabildiğinden dolayı şarj dolumu sırasındaki uzun bekleyiş vakit sıkıntısı olan kişiler için sorun oluşturmaktadır [21]. Batarya değişirme yönteminin uzun batarya ömrü, düşük kullanım süresi ve düşük işletme maliyeti gibi avantajları vardır [17]. Batarya değişirme tesisleri dağıtım transformatörleri, AA-DA dönüştürücüler, batarya şarj cihazları, bataryalar, robotik kollar, şarj rafları, bakım sistemleri, kontrol sistemleri, takas ve şarj ile ilgili diğer cihazlardan oluşmaktadır [33, 34]. Batarya değişirme sisteminin en önemli avantajlarından biri V2G özelliğine sahip olmasıdır [1].

## 3. HIZLI ŞARJ YÖNTEMLERİ (SEVİYE 3 VE SEVİYE 4) (FAST CHARGING METHODS (LEVEL 3 AND LEVEL 4))

EA'lar elektrik elektronik sektöründe yeni bir boyut oluşturmuştur. Bu yeni teknolojiyi tüm dünyada aynı şekilde kullanabilmek için her yönünü standartlaştırmak gerekmektedir [35]. Buna göre IEC standartlarında seviye 3 (AA) ve seviye 4 (DA) hızlı şarj olarak bilinirken, seviye 4 şarj istasyonu MW değerlerinde bir şarj kapasitesi gerektirebilmektedir. Hızlı bir şarj istasyonundan beklenen özellikler aşağıda sıralanmıştır.

Şebeke desteği: Hızlı şarjın MW cinsinden güç talebinin sebep olduğu sorunları gidermek için şarj istasyonu ortak bağlantı noktası gerilimini korumak ve gerilim kararsızlığını önlemek için şebekeye reaktif güç gönderebilmelidir. Şebeke desteği reaktif ve/veya aktif gücün şebekeye geri gönderilmesine bağlı olduğundan şarj istasyonu için V2G topolojisine sahip olması önem arz etmektedir [5].

Yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu: Yenilenebilir enerji kaynakları şarj istasyonuna kısmen de olsa şarj gücü sağlayabilmektedir. Böylece güç sisteminden çekilen güç miktarı azaltılarak tepe yük, aşırı yük ve gerilim düşümü gibi EA şarjı ile ilgili bazı problemler giderilmiş olunur. Yenilenebilir enerji kaynaklarının güç sistemi olarak kullanıldığı ve V2G topolojinin uygulandığı şarj istasyonları önemli ölçüde enerji tasarrufu sağlamaktadır [5].

Güç yoğunluğu: Kullanılabilir toplam gücün şarj istasyonunun kapladığı alana oranı olarak tanımlanmaktadır [5]. Hızlı şarj istasyonu sayısı artmaya devam ettikçe şebekeye olumsuz etkilerin önlenmesi için yüksek kapasiteli elektrik altyapısına yakın hızlı şarj istasyonları yerleştirilmelidir. Böylece, güç yoğunluğunun kontrol edilmesi sağlanabilecektir [36].

Hücresel ağ: İstasyonlar yoğun talep ve V2G topolojisi gibi durumlarda hücresel ağ ve internet erişimi gerektiren iletişime bağlı olduğundan bu istasyonların akıllı şebeke ile iletişim halinde olması gerekmektedir. Bu iki tesisin bir şarj istasyonunda bulunmasıyla hem EA'nın ihtiyaçları karşılanır hem de şebeke desteği sağlanabilmektedir [37].

Şarj istasyonlarının yerleşimi: EA şarj istasyonlarının verimli çalışmasını, gelecekteki yatırım ve destekleri sürdürmek için oldukça önemlidir. Şarj istasyonlarının planlanan konumlara yerleştirilmesiyle yatırım kazancı en üst düzeye çıkarılır ve elektrik şebekesi üzerindeki stres en aza indirilir [38].

Güvenlik: Sistemdeki güç elektroniği cihazları ve kontrol sistemlerinin karmaşıklığı sistem güvenliği için risk oluşturmaktadır [5]. İlave olarak, şarj istasyonlarının hava koşullarına ve kaza riskine karşı güvenlik önlemleri de dikkate alınmalıdır.

EA şarj istasyonlarının elektrik şebekesine yüklenmesiyle birçok güç kalitesi problemi oluşmaktadır. Ayrıca, AA gücünü DA gücüne dönüştürürken harmonikler oluşmakta ve bu harmonikler şebekenin güç kalitesini olumsuz yönde etkilemektedir. Bu nedenle EA'ların şarj edilmesi sırasında IEEE-519 güç kalitesi standartlarına uyulması gerekmektedir. IEEE-519 standartlarına göre seviye 1 istasyonunda THB değeri

%15'ten az veya eşit olmalıyken, seviye 2 istasyonunda %12'den az veya eşit, seviye 3 ve seviye 4 istasyonlarında ise %8'den az olmalıdır [39].

Bazı EA modellerine ait farklı seviyedeki şarj süreleri Tablo 3'te oluşturulmuştur.

**Tablo 3. EA'ların Farklı Seviyedeki Şarj Süreleri**

Marka	Batarya tipi ve enerji	En yüksek menzil	Konnektör tipi	Seviye 1		Seviye 2		Seviye 4		Kaynak
				Güç	Süre	Güç	Süre	Güç	Süre	
TOGG SUV	Li-Ion 120Ah Hücre 85,2kW/s Li-Ion 150Ah Hücre 106,5kW/s	300- 500km	IEC 62196-2 CHAdeMO	test aşaması	test aşaması	test aşaması	30 dk'dan az (%80)	DA 125A 50kW	test aşaması	[40]
RENAULT ZOE	Li-Ion 41kW/s	403km	EC 62196-2 Duvar tipi CHAdeMO	test aşamasında	test aşaması	14kW (380V)	2,5s	test aşaması	test aşaması	[41]
BMW İ3	Li-Ion 33,2kW/s	260km	BMW Duvar tipi CHAdeMO	test aşaması	test aşaması	11kW (380V)	3s (%80)	DA 125A 50kW	39dk (%80)	[42]
Mercedes EQC SUV	Li-Ion 80kW/s	354km	Mercedes Duvar tipi CHAdeMO	test aşaması	test aşaması	9,6- 16,8kW	8s	DA 125 A 50kW	40dk	[43]
Nissan Leaf	Li-Ion 40kW/s	241km	SAE J1772/IEC 62196-2 CCS Combo1	test aşaması	test aşaması	6kW	8s	DA 125A 50kW	40dk (%80)	[44]
Toyota RAV4	Li-Ion 40kW/s	160km	EC 62196-2 Duvar tipi SAE J1772	1,9kW	17s	9,6kW	3,35s	DA 125A 50kW	64dk	[45]
TESLA MODEL x	Li-Ion 100kW/s	528km	Tesla HPWC, Tesla supercharger	1,8kW	35s	9,6- 16,8kW	10s	DA 125A 50kW	30dk (%80)	[46]
AUDI e-TRON	Li-Ion 95kW/s	400km	IEC 62196-2 CHAdeMO CCS	test aşaması	test aşaması	11-22kW	4-9s	DA 125A 50kW	30dk	[47]
Jaguar I-Pace	Li-Ion 90kW/s	470km	connector tip-2 ve Hızlı şarj	3,7kW	30s	22kW	13s	DA 125A 150kW	45dk	[48]
Tesla Roadster	Li-Ion 53kW/s	340km	Tesla HPWC, Tesla supercharger	1,8kW	21s	16,8kW	2,2s	DA 125A 150kW	37dk	[49]
Honda-e	Li-Ion 35,5kW/s	200km	CCS connector- IEC 62196	2,3kW	16,30s	22kW	5,45s	DA 150kW	31dk	[50]
Peugeot e-280	Li-Ion 47,5kW/s	295km	CCS Connector- IEC 62196	2,3-3,7kW	24-15s	22kW	5s	DA 150kW	28dk	[51]

Tüm dünyadaki ülkeler EA teknolojisine uyum sağlayabilmek için planlamalar yapmaktadır. Tablo 4' te EA kullanımını artırabilmek için hızlı şarj istasyonu kurulum projeleri verilmiştir.

**Tablo 4. Ülkelerin EA Hızlı Şarj İstasyonu Projeleri**

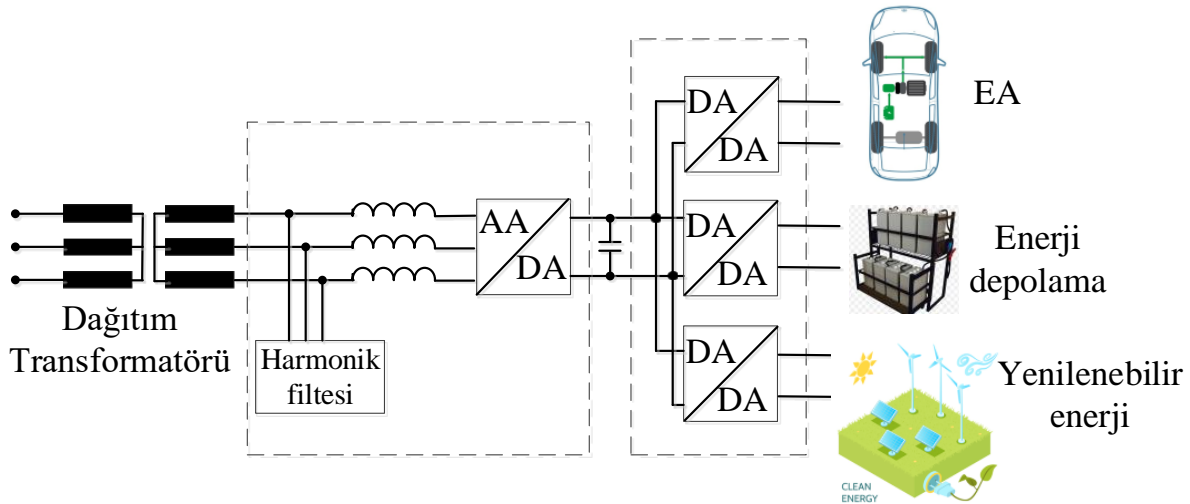
Ağ Adı	Bölge	Hızlı şarj istasyonu sayısı	Şarj gücü	Zaman çizelgesi	Kay.
ULTRA E	Avrupa	25	350kW	2016 -2019	[52]
VOLTRUN	Türkiye	156	50kW	2017 -2020	[53]
IONITY	Avrupa	400	350kW	2017 -2020	[54]
Çin Devlet Şebeke Şirketi (State Grid Corporation of China)	Çin	11.000	belirtilmemiştir	2017- devam	[55]
ABB	Endonezya	belirtilmemiştir	20kW	2019-2025	[56]
Electrify America	Amerika	2.000'den fazla	50kW-350kW	2016-2020	[57]
Mega -E	20 Avrupa ülkesi	322	350kW	2018- 2025	[58]
Next- E	Batı Avrupa	252	50kW-350kW	2017- devam	[59]

### 3.1. Hızlı Şarj İstasyonu Topolojileri (Fast Charging Station Topologies)

Literatürde, yukarıda belirtilen bazı özellikleri sağlayabilen ve aşağıdaki gibi üç kategoride sınıflandırılabilen hızlı şarj istasyonları için çeşitli topolojiler önerilmektedir [5].

#### 3.2.3.2.1. AA/DA/DA dönüştürücülü topoloji (Topologies with back to back AC/DC/DC Converters)

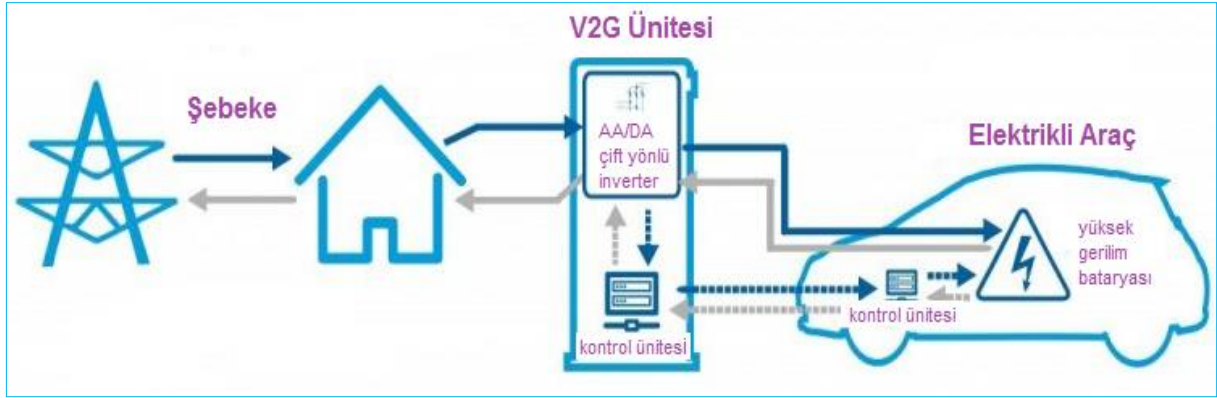
EA güç kaynağının farklı DA enerji kaynaklarından (süper kapasitör vb.) beslenmesi durumunda en az bir tane DA/DA dönüştürücüye ihtiyaç duyulmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının sürekliliğini artırmak ve hızlı şarjın dağıtım şebekesi üzerindeki olumsuz etkilerini azaltmak için bu topolojiler kullanılabilir [5]. Bu topoloji V2G ve tek yönlü şarj istasyonları olarak iki sınıfa ayrılmaktadır. Şekil 2'de AA/ DA/ DA dönüştürücülü şarj istasyonu gösterilmiştir.



Şekil 2. AA/ DA/ DA Dönüştürücülü Şarj İstasyonu [5].

### V2G şarj istasyonları (V2G Charging Stations)

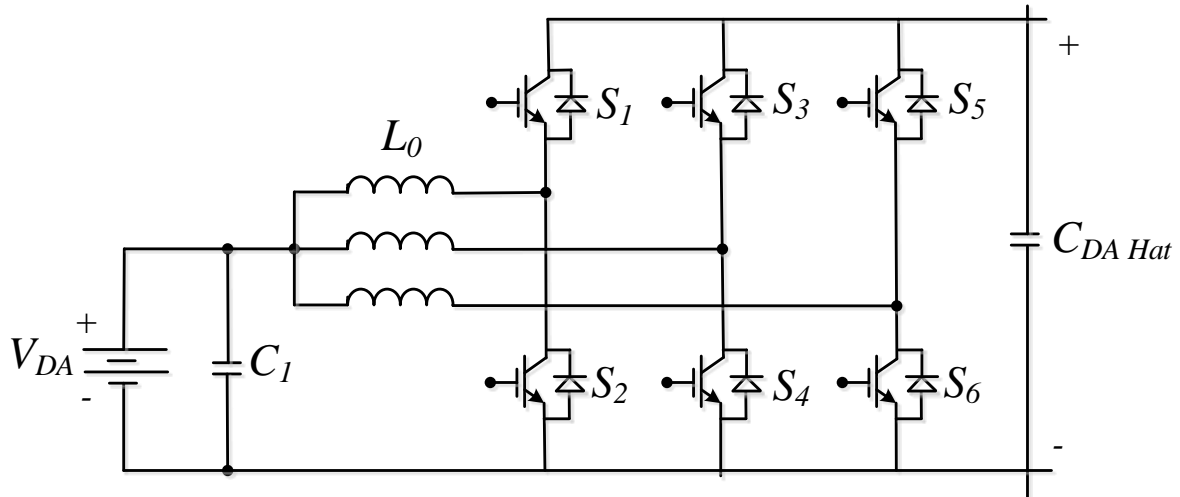
V2G şarj istasyonları EA'ların şebekeye enerji iletimini sağlayan bir sistemdir. Bu sistem şarj-deşarj çalışma modundan kaynaklanan şebeke üzerindeki olumsuz etkileri azaltmaya yardımcı olur. V2G'nin bağlantı-bağlantı kesme, yumuşak başlatma-durdurma, otomatik şarj-deşarj ve rampa hızı işlevleri gibi çeşitli akıllı şarj topolojileri bulunmaktadır. Bu sistem tepe akımı endüktörleri sebebiyle yavaş çalışır ve bu durum şarj istasyonu maliyetini artırmaktadır. Genel olarak iki aşamadan oluşmaktadır; 1- Şebekeye bağlı iki yönlü AA/DA dönüştürücü ve 2- iki yönlü bir DA/DA dönüştürücüdür. V2G şarj istasyonlarının şarj vedeşarj olmak üzere iki çalışma şekli bulunmaktadır [60, 61].



Şekil 3. V2G Şarj İstasyonu [62]

Bu topoloji EA kullanıcılarına daha düşük şarj maliyeti, daha düzgün çıkışı gerilimi ve gerilim kararlılığı sağlamaktadır [63]. Çok sayıda EA'nın dağıtım şebekesinden beslenmesi durumunda düşük gerilim geçişlerinde arızalar oluşabilmektedir. Bu gibi durumlarda şebekeye destek vermek için V2G şarj istasyonlarının kullanılmasıyla arızalara engel olunabilmektedir [64].

Şekil 4'te V2G'ye ait DA/DA dönüştürücü topolojisi gösterilmiştir.



Şekil 4. V2G DA/DA Dönüştürücü [65]

V2G şarj istasyonları aynı anda birden fazla EA'nın şarj olmasını imkan sağlamaktadır. Bu konuda Arancibia ve ark.[66] 1050kVA gücünde ve 10 girişli bir V2G şarj istasyonu tasarlamışlardır. Bu şarj istasyonunu güçlü bir orta gerilim dağıtım şebekesine bağlanmışlar ve maksimum 900kW şarj yükü ile yüklendiğinde iyi bir performans gözlemlemişlerdir.

Bu istasyonlar akıllı şebekeler ile de uyumlu çalışabilmektedir. Öyle ki V2G güç alışverişi amacıyla akıllı evleri, otoparkları ve hızlı şarj istasyonlarını kullanabilmektedir. EA şarj istasyonlarının V2G şarj modunda verimli çalışabilmesi için orta gerilim şebekesine bağlanması gerekmektedir. Akıllı şebekelerle ortak çalışma durumlarında V2G şarj istasyonları dahili kapasitörlerini kullanarak şebekeye reaktif güç sağlamaktadır. V2G şarj istasyonlarının çalışma verimlerini artırma imkanları vardır [67]. Bu sistemin en büyük dezavantajı döngüsel şarj ve deşarj nedeniyle oluşan batarya ömrünün kısalmasıdır [68].

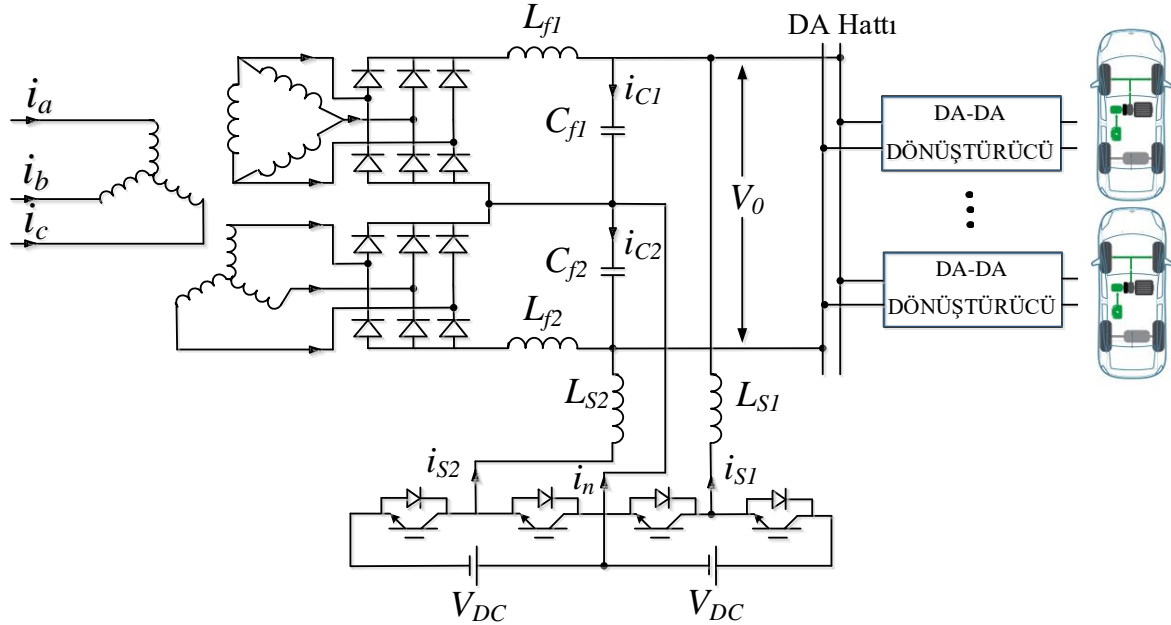
#### Tek yönlü şarj istasyonları (Unidirectional Charging Stations)

Tek yönlü şarj istasyonları yalnızca şebekeden güç çekebilmektedir, yani şebekeye güç desteği sağlayamamaktadırlar. Bu topolojinin avantajları arasında boyut, ağırlık ve düşük maliyet sıralanabilmektedir [60]. Aynı zamanda, bu topoloji EA'ların elektrik şebekesinden şarj edildiği yöntem



olan şebekeden araca (G2V) şarj modunu desteklemektedir. Bu özellikleri sayesinde sistemin güvenilirliği artmaktadır [69].

Şekil 5'te tek yönlü AA/ DA/ DA dönüştürücülü şarj istasyonu gösterilmiştir.



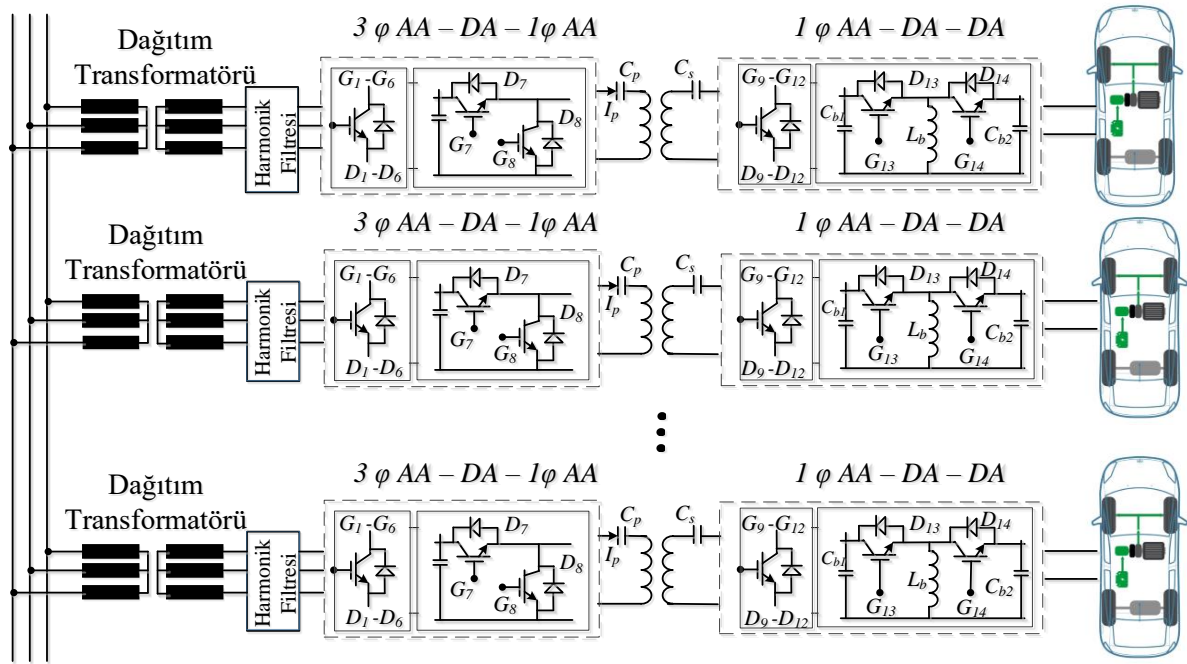
**Şekil 5.** Tek Yönlü AA/ DA/ DA Dönüştürücülü Şarj İstasyonu [5]

Şekil 5'te gösterildiği gibi bu topolojiye ait DA gerilimi iki DA-DA dönüştürücüsü tarafından kontrol edilmektedir. Bu dönüştürücüler kontrolsüz doğrultucu tarafından üretilen AA akım harmoniklerini ortadan kaldırmak için aktif filtreleme görevi de üstlenmektedir. Bu topolojideki enerji depolama işlemi kapasitörlerin yerine DA-DA dönüştürücülerin DA bağlantısındaki bataryalarla gerçekleştirilmektedir. Dönüştürme işlemi maliyeti azaltmak için diyot doğrultucu ile gerçekleştirilmektedir. Bu durum MW şarj gücü gerektiren hızlı bir şarj istasyonu için gerilim düşümü sorunu ile karşılaşıldığında telafisinin yapılamayacağı anlamına gelmektedir. Tek yönlü olan bu topolojide şebeke destek özellikleri bulunmamaktadır [5].

### 3.2.2. Ortak AA bağlantılı çok noktalı topoloji (Multiport Stations with common AC link)

Bu topoloji uygulama açısından gayet basit olup içeriğindeki dönüştürücünün düşük gerilim şebekelerinde kullanılmasına imkan tanımaktadır. Dahası, yüksek verimli anahtarlama ve koruma cihazları ile daha hızlı şarj edebilme imkanı sağlamaktadır [8]. Ahmadi ve ark. [5] yaptıkları çalışmada üç fazlı 50Hz AA gerilimini ara bir DA gerilimine dönüştürmektedir. Daha sonra oluşan bu DA gerilimi yüksek frekanslı 25kHz AA gerilimine dönüştürülmekte ve yüksek frekans gerilimi EA şarj cihazına aktarılmaktadır. Bu topolojinin önemli avantajlarından biri olarak V2G teknolojisinin aynı anda birden fazla EA'ya şarj imkanı sağladığını belirtmişlerdir. Joy ve ark. [70] ise V2G ve G2V şarj durumlarında çalışabilen ortak AA bağlantılı çok noktalı bir şarj istasyonu tasarlamışlardır. Tasarladıkları çok noktalı çift yönlü temassız şarj topolojisini farklı batarya değerlerine sahip beş EA ile test etmişler ve başarılı sonuçlar gözlemlemişlerdir.

Şekil 6'da ortak AA bağlantılı çok noktalı topoloji gösterilmiştir.



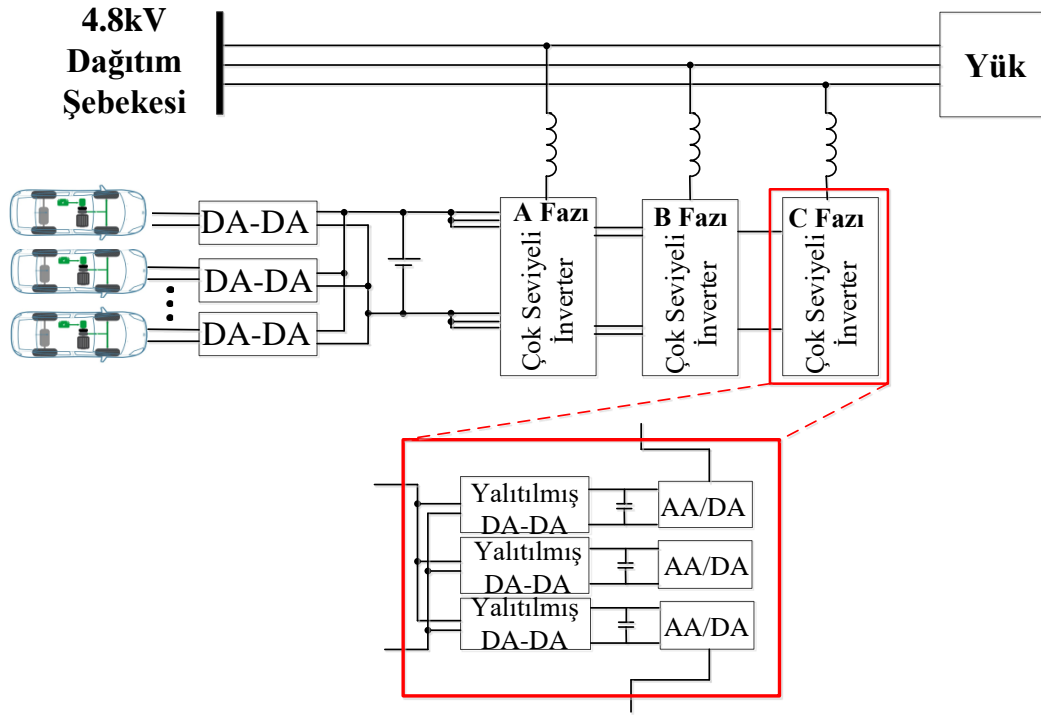
Şekil 6. Ortak AA Bağlantılı Çok Noktalı Topoloji [5]

Şekil 6'da gösterildiği gibi her bir şarj cihazında sistemin verimliliğini ve güvenilirliğini artıran özel bir cihaz seti bulunmaktadır. Bu topoloji hızlı şarj işlemi gerçekleştirmek için tasarlanmıştır ve birden fazla sayıda EA'yı şarj edebilmektedir [5].

### 3.2.3. Transformatörsüz topoloji (Transformerless Charging Stations)

Transformatörsüz topoloji hat transformatörünün şarj istasyonundan çıkarılmasıyla oluşturulmuş bir topolojidir. Bu topolojinin temel amacı şarj istasyonunun güç kapasitesini artırmaya çalışmaktır. Normal koşullar altında hat transformatörü kullanmadan gerilim seviyesini düşürmek için dönüştürücünün iki farklı bağlantı seçeneği vardır. İlk seçenek şarj istasyonunu düşük gerilim şebekesinden beslemektir. Fakat, bu teknikte yüksek akım çekilmesi nedeniyle yüksek iletim kaybı oluşmaktadır. İkinci seçenek ise şarj istasyonunu doğrudan bir orta gerilim şebekesinden besleyerek şarj akımlarının genliğini azaltmaktır [71,72].

Şekil 7'de orta gerilim kademeli çok seviyeli invertör kullanılmasıyla gerçekleştirilen ikinci seçenek gösterilmiştir.



Şekil 7. Çok Seviyeli Dönüştürücülü Topoloji [5]

Şekil 7’de görüldüğü gibi şarj istasyonu doğrudan 4,8kV’luk bir şebekeye bağlanmıştır. Dağıtım şebekesi ve her ara aşama çok seviyeli dönüştürücü gruplarından (AA/DA/DA) meydana gelmektedir. Enerji depolanması için kapasitörlerin yerine DA tarafında batarya grupları kullanılmıştır, ki bu topolojinin en önemli özelliğidir. EA’nın şarj edilmediği durumlarda enerji bu batarya gruplarına depolanmaktadır. Fakat, bu topolojide hat transformatörü yerine birkaç tane çok seviyeli dönüştürücünün kullanılması ve aynı zamanda batarya gruplarının eklenmesiyle şarj istasyonunun şebekeye olan olumlu/olumsuz etkileri olabilecektir [5].

#### 4. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada EA şarj istasyonlarının yapısı, işleyişi ve gerekliliğinden bahsedilmiştir. Dünyadaki toplam EA artışı ile birlikte ihtiyaç duyulan şarj istasyonlarının şarj süreleri, şarj kapasiteleri, şebeke güvenlikleri ve güç kaliteleri araştırılmıştır.

Uygulamadaki şarj istasyonu teknikleri kablolu şarj, kablosuz (endüktif) şarj ve batarya değiştirme olmak üzere üç ana bölüme ayrılmıştır. Kablolu şarj kendi içinde dahili şarj ve harici şarj olarak ayrılırken, kablosuz (endüktif) şarj kendi içinde statik şarj ve dinamik şarj olarak alt sınıflara ayrılmıştır. Dinamik şarj yönteminde araç hareket halindeyken şarj edebilme özelliği vardır, ki bu özellik EA kullanıcıları için büyük bir kolaylıktır. Dahili şarj yöntemi ise üç alt seviyeye (seviye 1, seviye 2, seviye 3) ayrılırken, harici şarj diğer bir isimle seviye 4 olarak tanımlanmıştır. Bu modellerden seviye 1 ve seviye 2 yavaş şarj (AA) istasyonu, seviye 3 hızlı şarj (AA) istasyonu ve seviye 4 ise hızlı şarj (DA) istasyonu olarak tanımlanmıştır.

EA’ların gelecek teknolojilerine uyum sağlayabilmesi için hızlı şarj istasyonlarının (seviye 3 ve seviye 4) bir hayli önemli olduğu görülmüştür. EA kullanıcıları uzun süren şarj sürelerine karşı zaman tasarrufu sağlayabilmek için hızlı şarj istasyonlarına yönelmektedirler. Bu durumda bu istasyonların kullanıcı/şebeke güvenliği, sistem kararlılığı ve enerjinin verimli kullanımı açısından IEC standartlarına uygun tasarlanması gerekmektedir.

Seviye 4 modelinin MW’lar seviyesinde şarj kapasitesine sahip olması elektrik şebekeleri için bir tehdit unsuru olarak görülmüştür. Güç talebinden kaynaklanan sorunları gidermek, şarj istasyonu ortak bağlantı noktası gerilimini korumak ve gerilim kararsızlığını önlemek için şebekeye reaktif güç göndermek bu tehdide karşı alınabilecek önlemler arasında yer almaktadır. Diğer bir önlem ise hızlı şarj istasyonu

topolojilerinden olan V2G şarj yönteminin kullanılmasıdır. Araştırmalarda V2G topolojisinin kullanımıyla büyük miktarda enerji tasarrufu sağlandığı ve yenilebilir enerji kaynaklarıyla uyumlu çalışabildiği görülmüştür. Bekleme ve şarj sürelerinin kontrolünün sağlanması ile maksimum sayıda EA'nın şarj istasyonuna bağlanarak maksimum verimle enerji tasarrufu sağlayabildikleri görülmüştür. Fakat V2G istasyonlarının maliyeti oldukça yüksektir ve bu yöntemin verimliliğini artırabilmek için ortak AA bağlantılı çok noktalı topoloji ile birlikte kullanılması önerilmektedir. Bu sayede şarj istasyonu aynı anda birden fazla EA'yı şarj edebilecek kapasiteye ulaşmış olacaktır. Ayrıca, bir şarj istasyonunun tasarımı kadar doğru yere konumlandırılmasının da enerji verimliliği açısından önemli bir etken olduğu sonucuna varılmıştır.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Sutopo, W., Nizam, M., Rahmawatie, B., & Fahma, F. (2018, October). A Review of Electric Vehicles Charging Standard Development: Study Case in Indonesia. In *2018 5th International Conference on Electric Vehicular Technology (ICEVT)* (pp. 152-157). IEEE.
- [2] Maggetto, G., & Van Mierlo, J. (2000). Electric and electric hybrid vehicle technology: a survey. *IEE Seminar Electric, Hybrid and Fuel Cell Vehicles*, Durham, UK, pp. 1/1-111.
- [3] Rnstvik, H. N. (2013, November). Norway's electric vehicle deployment success. A historical review including plans for fast charging stations covering all of the country-By 2015. In *2013 World Electric Vehicle Symposium and Exhibition (EVS27)* (pp. 1-10). IEEE.
- [4] Tu, H., Feng, H., Srdic, S., & Lukic, S. (2019). Extreme Fast Charging of Electric Vehicles: A Technology Overview. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*.
- [5] Ahmadi, M., Mithulananthan, N., & Sharma, R. (2016, September). A review on topologies for fast charging stations for electric vehicles. In *2016 IEEE International Conference on Power System Technology (POWERCON)* (pp. 1-6). IEEE.
- [6] Ng, T. W., Liu, J. F., & Cheng, K. W. E. (2011, June). A review of international charging coupler standards and its availability in Hong Kong. In *2011 4th International Conference on Power Electronics Systems and Applications* (pp.1-4). IEEE.
- [7] Angelov, G., Andreev, M., & Hinov, N. (2018, May). Modelling of electric vehicle charging station for DC fast charging. In *2018 41st International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE)* (pp. 1-5). IEEE.
- [8] Ronanki, D., Kelkar, A., & Williamson, S. S. (2019). Extreme Fast Charging Technology—Prospects to Enhance Sustainable Electric Transportation. *Energies*, 12(19), 3721.
- [9] Sahoo, J. K., & Mathew, A. T. (2017, July). Design of a ZCS full-Bridge DC-DC converter for PV based electric vehicle fast charging station. In *2017 IEEE Region 10 Symposium (TENSymp)* (pp. 1-5). IEEE.
- [10] Domínguez-Navarro, J. A., Dufo-López, R., Yusta-Loyo, J. M., Artal-Sevil, J. S., & Bernal-Agustín, J. L. (2019). Design of an electric vehicle fast-charging station with integration of renewable energy and storage systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 105, 46-58.
- [11] Geske, M., Komarnicki, P., Stötzer, M., & Styczynski, Z. A. (2010, September). Modeling and simulation of electric car penetration in the distribution power system—Case study. In *2010 Modern Electric Power Systems* (pp. 1-6). IEEE.
- [12] Nikitha, L., Anil, L., Tripathi, A., & Nagesh, S. (2017, August). Effect of electrical vehicle charging on power quality. In *2017 International Conference on Energy, Communication, Data Analytics and Soft Computing (ICECDS)* (pp. 2149-2153). IEEE.

- [13] Shaarbaf, M. R., & Ghayeni, M. (2018, May). Identification of the Best Charging Time of Electric Vehicles in Fast Charging Stations Connected to Smart Grid Based on Q-Learning. In *2018 Electrical Power Distribution Conference (EPDC)* (pp. 78-83). IEEE.
- [14] Malik, F. H., & Lehtonen, M. (2017, September). Minimization of queuing time of electric vehicles at a fast charging station. In *2017 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe)* (pp. 1-6). IEEE.
- [15] Sadeghi-Barzani, P., Rajabi-Ghahnavieh, A., & Kazemi-Karegar, H. (2014). Optimal fast charging station placing and sizing. *Applied Energy*, *125*, 289-299.
- [16] Victor-Gallardo, L., Angulo-Paniagua, J., Bejarano-Viachica, R., Fuentes-Soto, D., Ruiz, L., Martínez-Barboza, J., & Quirós-Tortós, J. (2019, September). Strategic Location of EV Fast Charging Stations: The Real Case of Costa Rica. In *2019 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference-Latin America (ISGT Latin America)* (pp. 1-6). IEEE.
- [17] Ahmad, A., Khan, Z. A., Saad Alam, M., & Khateeb, S. (2018). A review of the electric vehicle charging techniques, standards, progression and evolution of EV technologies in Germany. *Smart Science*, *6*(1), 36-53.
- [18] Dericioglu, C., Yirik, E., Unal, E., Cuma, M. U., Onur, B., & Tumay, M. (2018). A Review of Charging Technologies For Commercial Electric Vehicles. *International Journal of Advances on Automotive and Technology*, *2*(1), 61-70.
- [19] Meissner, E., & Richter, G. (2003). Battery monitoring and electrical energy management: Precondition for future vehicle electric power systems. *Journal of power sources*, *116*(1-2), 79-98.
- [20] Paschero, M., Anniballi, L., Del Vescovo, G., Fabbri, G., & Mascioli, F. M. F. (2013, May). Design and implementation of a fast recharge station for electric vehicles. In *2013 IEEE International Symposium on Industrial Electronics* (pp. 1-6). IEEE.
- [21] Kerem, A. (2014). Elektrikli araç teknolojisinin gelişimi ve gelecek beklentileri. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, *5*(1), 1-13.
- [22] İnternet: Elektrikli Araç Şarj Modları, Erişim adresi: <https://esarj.com/sarj-modlari>, Son Erişim Tarihi: 12.02.2020
- [23] Yilmaz, M., & Krein, P. T. (2012). Review of battery charger topologies, charging power levels, and infrastructure for plug-in electric and hybrid vehicles. *IEEE transactions on Power Electronics*, *28*(5), 2151-2169.
- [24] IEC, I. (2010). 61851-1: Electric vehicle conductive charging system-part 1: General requirements,”. *IEC (International Electrotechnical Commission), Geneva, Switzerland*.
- [25] Ricaud, C., & Vollet, P. (2010). Connection method for charging systems—a key element for electric vehicles. *Schneider Electric*.
- [26] Ahmad, A., Alam, M. S., & Chaban, R. C. (2017, June). Efficiency enhancement of wireless charging for electric vehicles through reduction of coil misalignment. In *2017 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)* (pp. 21-26). IEEE.
- [27] Lukic, S., & Pantic, Z. (2013). Cutting the cord: Static and dynamic inductive wireless charging of electric vehicles. *IEEE Electrification Magazine*, *1*(1), 57-64.
- [28] Karakitsios, I., Karfopoulos, E. L., & Hatziaargyriou, N. (2014). Static and dynamic fast inductive charging: The FastInCharge project concept.
- [29] Panchal, C., Stegen, S., & Lu, J. (2018). Review of static and dynamic wireless electric vehicle charging system. *Engineering science and technology, an international journal*, *21*(5), 922-937.




- [30] Rim, C. T., & Mi, C. (2017). *Wireless power transfer for electric vehicles and mobile devices*. John Wiley & Sons.
- [31] J. Young Jae, K. Young Dae, J. Seungmin, Optimal design of the wireless charging electric vehicle, in: Electric Vehicle Conference (IEVC), 2012 IEEE International, 2012, pp. 1–5.
- [32] Niculae, D., Iordache, M., Stanculescu, M., Bobaru, M. L., & Deleanu, S. (2019, March). A Review of Electric Vehicles Charging Technologies Stationary and Dynamic. In *2019 11th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE)* (pp. 1-4). IEEE.
- [33] Avci, B., Girotra, K., & Netessine, S. (2015). Electric vehicles with a battery switching station: Adoption and environmental impact. *Management Science*, 61(4), 772-794.
- [34] Zheng, Y., Dong, Z. Y., Xu, Y., Meng, K., Zhao, J. H., & Qiu, J. (2013). Electric vehicle battery charging/swap stations in distribution systems: comparison study and optimal planning. *IEEE transactions on Power Systems*, 29(1), 221-229.
- [35] Das, H. S., Rahman, M. M., Li, S., & Tan, C. W. (2019). Electric vehicles standards, charging infrastructure, and impact on grid integration: A technological review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 109618.
- [36] Hall, D., & Lutsey, N. (2017). Emerging best practices for electric vehicle charging infrastructure. *Washington, DC: The International Council on Clean Transportation (ICCT)*.
- [37] Bhattacharjee, S., Batool, S., Nandi, C., & Pakdeetrakulwong, U. Investigating Electric Vehicle (EV) Charging Station Locations for Agartala, India.
- [38] Hatton, C. E., Beella, S. K., Brezet, J. C., & Wijnia, Y. (2009). Charging Stations for Urban Settings the design of a product platform for electric vehicle infrastructure in Dutch cities. *World Electric Vehicle Journal*, 3(1), 134-146.
- [39] Shafad, K. H., Jamian, J. J., & Nasir, S. A. S. (2016, December). Harmonic distortion mitigation for multiple modes charging station via optimum passive filter design. In *2016 IEEE Conference on Systems, Process and Control (ICSPPC)* (pp. 219-223). IEEE.
- [40] İnternet: Elektrikli araçlar. TOGG elektrikli araç teknik özellikleri, Erişim adresi: <https://togg.com.tr/content/otomobil>, Son Erişim Tarihi: 27.12.2019
- [41] İnternet: Elektirikli araçlar. Renault araç teknik özellikleri, Erişim adresi: <https://www.cdn.renault.com/content/dam/Renault/TR/global-brochures/Renault-Zoe-Zcard.pdf>, Son Erişim Tarihi: 07.02.2020
- [42] İnternet: Elektrikli araçlar. BMW elektrikli araç teknik özellikleri, Erişim adresi: <http://kosifleroto.com.tr/bmw/iserisi/i3/menzilsarj>, Son Erişim Tarihi: 27.01.2019
- [43] İnternet:Editör, Mercedes Benz EQC 400 4 Matic İncelemesi[blog], Erişim adresi: <https://www.arabam.com/blog/otomobil-inceleme/mercedes-benz-eqc-400-4-matic-incelemesi/>, Son Erişim Tarihi: 04.02.2020
- [44] İnternet: Elektrikli araçlar. Nissan elektrikli araç teknik özellikleri, Erişim adresi: <https://www.nissanusa.com/vehicles/electric-cars/20-leaf/features/range-charging-battery.html>, Son Erişim Tarihi: 27.11.2019
- [45] Kirsten Korosec. (2019, 21 November). Toyota's first plug-in hybrid RAV4 piles on the power and fuel efficiency. Erişim adresi: <https://techcrunch.com/2019/11/21/toyotas-first-plug-in-hybrid-rav4-bataryaes-on-the-power-and-fuel-efficiency/>
- [46] İnternet: Elektrikli araçlar. Tesla X elektrikli araç teknik özellikleri, Erişim adresi: <https://www.tesla.com/modelx>, Son Erişim Tarihi: 01.02.2020

- [47] İnternet: Elektrikli araçlar. Audi-e-tron elektrikli araç teknik özellikleri, Erişim adresi: <https://www.audi.com.tr/tr/web/tr/modeller/tron/audi-e-tron.html>, Son Erişim Tarihi: 14.01.2020
- [48] İnternet: Elektrikli araçlar. Jaguar ipace elektrikli araç teknik özellikleri, Erişim adresi: <https://www.jaguar-turkiye.com/compare?carkey1=ipace-s-400a>, Son Erişim Tarihi: 16.12.2019
- [49] İnternet: Elektrikli araçlar. Tesla Roadster elektrikli araç teknik özellikleri, Erişim adresi: <https://www.tesla.com/roadster>, Son Erişim Tarihi: 20.01.2020
- [50] İnternet: Elektrikli araçlar. Honda-e elektrikli araç teknik özellikleri, Erişim adresi: <https://ev-database.org/car/1171/Honda-e>, Son Erişim Tarihi: 27.01.2020
- [51] İnternet: Elektrikli araçlar. Peugeot-e elektrikli araç teknik özellikleri, Erişim adresi: <https://ev-database.org/car/1168/Peugeot-e-208#charge-table>, Son Erişim Tarihi: 30.01.2020
- [52] İnternet: Elektrikli araçlar şarj istasyonları. Ultra-e şarj istasyon projeleri, Erişim adresi: <https://www.ultra-e.eu/> , Son Erişim Tarihi: 02.02.2020
- [53] İnternet: Elektrikli araçlar şarj istasyonları. Voltrun şarj istasyon projeleri, Erişim adresi: <https://www.voltrun.com/> , Son Erişim Tarihi: 15.12.2019
- [54] İnternet: Elektrikli araçlar şarj istasyonları. İonity şarj istasyon projeleri, Erişim adresi: <https://ionity.eu/> , Son Erişim Tarihi: 18.12.2019
- [55] İnternet: Xinhua, China's State Grid to install 120,000 public EV charging piles by 2020 [blog], Erişim adresi: <http://www.chinadaily.com.cn/a/201801/16/WS5a5d9072a3102c394518f8bf.html/>, Son Erişim Tarihi: 16.01.2020
- [56] İnternet: Article Jakarta, ABB supports one of the first fast charging stations in Indonesia, Erişim adresi: <https://new.abb.com/news/detail/15148/abb-supports-one-of-the-first-fast-charging-stations-in-indonesia/>, Son Erişim Tarihi: 24.01.2020
- [57] İnternet: Elektrikli araçlar şarj istasyonları. Electrify america şarj istasyon projeleri, Erişim adresi: <https://www.electrifyamerica.com/our-plan> , Son Erişim Tarihi: 25.12.2019
- [58] İnternet: Elektrikli araçlar şarj istasyonları. Allego şarj istasyon projeleri, Erişim adresi: <https://www.allego.eu/business/high-power-charging/>, Son Erişim Tarihi: 30.12.2019
- [59] İnternet: Elektrikli araçlar şarj istasyonları. Next-e şarj istasyon projeleri, Erişim adresi <https://next-e.eu/about.html>, Son Erişim Tarihi: 25.11.2019
- [60] Channegowda, J., Pathipati, V. K., & Williamson, S. S. (2015, June). Comprehensive review and comparison of DC fast charging converter topologies: Improving electric vehicle plug-to-wheels efficiency. In *2015 IEEE 24th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)* (pp. 263-268). IEEE.
- [61] Solanke, T. U., Ramachandaramurthy, V. K., Yong, J. Y., Pasupuleti, J., Kasinathan, P., & Rajagopalan, A. (2020). A review of strategic charging–discharging control of grid-connected electric vehicles. *Journal of Energy Storage*, *28*, 101193.
- [62] İnternet: V2G şarj istasyonları. Erişim adresi : <https://www.cleantech.com/ev-charging-software-and-grid-services/>, Son Erişim Tarihi: 11.06.2020
- [63] Kaiser, A., Nguyen, A., Pham, R., Granados, M., & Le, H. T. (2018, June). Efficient Interfacing Electric Vehicles with Grid using Bi-directional Smart Inverter. In *2018 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)* (pp. 178-182). IEEE.
- [64] Katić, V. A., Aleksandar, M., Dumnić, B. P., & Popadić, B. P. (2019, July). Impact of V2G operation of electric vehicle chargers on distribution grid during voltage dips. In *IEEE EUROCON 2019-18th International Conference on Smart Technologies* (pp. 1-6). IEEE.

- [65] Zhang, J., Lai, J. S., Kim, R. Y., & Yu, W. (2007). High-power density design of a soft-switching high-power bidirectional dc–dc converter. *IEEE Transactions on power electronics*, 22(4), 1145-1153.
- [66] Arancibia, A., & Strunz, K. (2012, March). Modeling of an electric vehicle charging station for fast DC charging. In *2012 IEEE International Electric Vehicle Conference* (pp. 1-6). IEEE.
- [67] Liu, C., Chau, K. T., Wu, D., & Gao, S. (2013). Opportunities and challenges of vehicle-to-home, vehicle-to-vehicle, and vehicle-to-grid technologies. *Proceedings of the IEEE*, 101(11), 2409-2427.
- [68] D. C. Erb, O. C. Onar, and A. Khaligh, "Bi-directional charging topologies for plug-in hybrid electric vehicles," in Proc. IEEE Application in Power Electronics Conference, Feb. 2010.
- [69] Prasad R., Namuduri C. and Phillip Kollmeyer, "Onboard unidirectional automotive G2V battery charger using sine charging and its effect on liion batteries". *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2015.
- [70] Joy, T. P., Kannan Thirugnanam, and Pranaw Kumar. "A multi-point Bidirectional Contactless Charging System in a charging station suitable for EVs and PHEVs applications." India Conference (INDICON), 2013 Annual IEEE. IEEE, 2013.
- [71] Wang, S., Crosier, R., & Chu, Y. (2012, March). Investigating the power architectures and circuit topologies for megawatt superfast electric vehicle charging stations with enhanced grid support functionality. In *2012 IEEE International Electric Vehicle Conference* (pp. 1-8). IEEE.
- [72] Crosier, R., & Wang, S. (2013). DQ-frame modeling of an active power filter integrated with a grid-connected, multifunctional electric vehicle charging station. *IEEE transactions on power electronics*, 28(12), 5702-5716.



## Investigation into Effects of Different Tempering Temperatures on Mechanical Properties of 51CrV4 Steel

 Hülya DURMUŞ  Fatma Gizem ÇAKIR  Canser GÜL\* 

Manisa Celal Bayar University, Material and Metallurgy Engineering Department, 45100, Manisa, Türkiye

### Graphical/Tabular Abstract

In this study, samples of 51CrV4 steel tempered at two different temperatures after annealing and oil cooling were examined. The changes in the morphology and mechanical properties of the samples processed at different temperatures were analyzed. The effects of tempering on wear resistance were discussed.

#### Article Info:

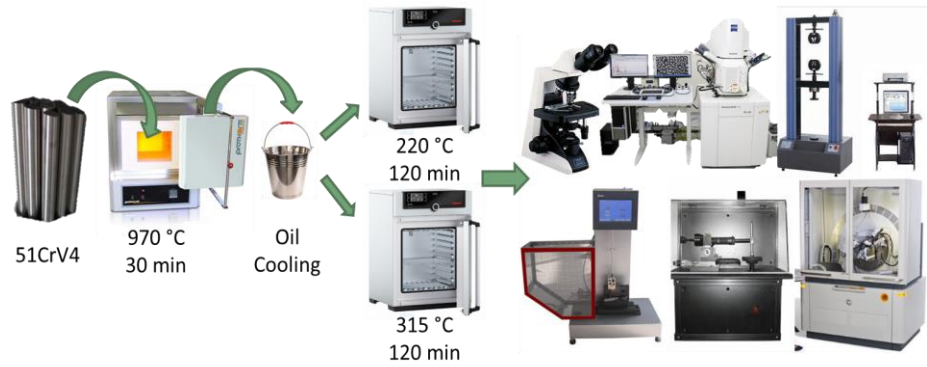
Research article  
 Received: 20/05/2020  
 Revision: 08/08/2020  
 Accepted: 09/08/2020

#### Highlights

- 51CrV4.
- Heat Treatment.
- Optical and Mechanical Properties

#### Keywords

51CrV4  
 Heat Treatment  
 Dry sand rubber wheel  
 Wear  
 Mechanical Properties



**Figure A.** Schematic representation of experimental studies

**Purpose:** The aim of the study is to discuss and compare the effects of different tempering temperatures on microstructure and mechanical properties.

**Theory and Methods:** Samples of 51CrV4 steel were annealed at 970 °C and oil cooled. Then, they were tempered at 220 °C and 315 °C and examined. Microstructures and morphological changes of steel samples were examined using optical microscope, SEM-EDS and XRD. Changes in mechanical properties were examined by tensile, Charpy impact and dry sand rubber wheel abrasion tests.

**Results:** Results show that two different microstructures consisting of carbide sediments in the ferritic matrix and containing a bainitic structure were reached. No significant difference was observed in the hardness measurements taken from the section and the surface. However, as a result of the tensile, Charpy impact, and dry sand rubber wheel abrasion tests, significant differences were observed between the sample groups and it was concluded that the most suitable tempering temperature was 315 °C.

**Conclusion:** 51CrV4 steel were tempered at two different temperatures after annealing and oil cooling and examined in this study. The changes in the morphology and mechanical properties of the samples processed at different temperatures were analyzed and presented.



## Farklı Menevişleme Sıcaklıklarının 51CrV4 Çeliğinin Mekanik Özelliklerine Etkilerinin İncelenmesi

Hülya DURMUŞ<sup>ID</sup> Fatma Gizem ÇAKIR<sup>ID</sup> Canser GÜL\*<sup>ID</sup>

Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 45100, Manisa, Türkiye

### Öz

Otomotiv ve makine endüstrilerinde, yorulma dayanımı yüksek olan birçok parçanın imalatında; yüksek mukavemetleri, yüksek darbe dayanımları ve mükemmel yorulma performansları nedeniyle 51CrV4 çelikleri tercih edilmektedir. Isıl işlem uygulanabilir ve sertleştirilebilir çelik grubunda yer alırlar. Yapılan bu çalışmada tavlama ve yağda soğutma yapıldıktan sonra farklı iki sıcaklıkta menevişleme işlemi uygulanan 51CrV4 çeliği numuneler incelenmiştir. Farklı sıcaklıkta işlem gören numunelerin, morfolojilerinde ve mekanik özelliklerindeki değişim incelenmiştir. Menevişleme işleminin aşınma dayanımı üzerine olan etkileri tartışılmıştır. Çalışmanın sonucunda ferritik matris içinde karbür çökeltilerinden oluşan ve beyritik yapı içeren iki farklı mikroyapıya ulaşılmıştır. Kesit ve yüzeyden alınan sertlik ölçümlerinde belirgin bir farklılık gözlemlenmemiştir. Buna rağmen, yapılan çekme, çentik darbe ve kuru kum kauçuk aşınma testleri sonucunda numune grupları arasında belirgin farklılıklar gözlemlenmiş ve en uygun menevişleme sıcaklığının 315 °C olduğu sonucuna varılmıştır.

### Makale Bilgisi

Araştırma makalesi  
Başvuru: 20/05/2020  
Düzeltilme: 08/08/2020  
Kabul: 09/08/2020

### Anahtar Kelimeler

51CrV4  
Heat Treatment  
Dry sand rubber wheel  
Wear  
Mechanical Properties

### Keywords

51CrV4  
Isıl İşlem  
Kuru Kum Kauçuk  
Tekerlek  
Aşınma  
Mekanik Özellikler

### Investigation into Effects of Different Tempering Temperatures on Mechanical Properties of 51CrV4 Steel

### Abstract

In the automotive and machinery industries; 51CrV4 steels are preferred due to their high strength, high impact strength, and excellent fatigue performance for the manufacturing of fatigue sensitive parts. They are included in the group of heat treatable and hardenable steels. In this study, samples of 51CrV4 steel tempered at two different temperatures after annealing and oil cooling were examined. The changes in the morphology and mechanical properties of the samples processed at different temperatures were analyzed. The effects of tempering on wear resistance were discussed. As a result of the study, two different microstructures consisting of carbide sediments in the ferritic matrix and containing a bainitic structure were reached. No significant difference was observed in the hardness measurements taken from the section and the surface. However, as a result of the tensile, charpy impact, and dry sand rubber wheel abrasion tests, significant differences were observed between the sample groups and it was concluded that the most suitable tempering temperature was 315 °C.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Yüksek mukavemetleri, yüksek darbe dayanımı ve mükemmel yorulma performansları nedeniyle 51CrV4 çelikleri kalıp çelikleri, yay çelikleri ve yüksek hız çelikleri olarak yaygın olarak kullanılmaktadır [1-3]. Otomotiv ve makine endüstrilerinde, yüksek yorulma dayanımına sahip olmasından dolayı birçok parça yay çeliğinden yapılmaktadır [4]. 51CrV4 çeliği öncelikle dişliler, çubuklar, miller, burçlar, mandreller, kamlar, kollar, elastik parçalar ve yaprak yağlar gibi yüksek mukavemetli makine parçalarının imalatında kullanılmaktadır [4,5].

Isıtma ve soğutma sırasında Cr bazlı karbürlerin morfolojileri ve dağılımı, Cr içeren çeliklerin mekanik özelliklerini etkilemektedir. etkisi fazla olan veya orta düzeyde olan karbür oluşturuç elemanların (Nb, Ti ve V) eklenmesi, Cr bazlı karbürlerin çökme davranışını olumlu etkilemekte ve C atomlarının difüzyonunu etki yapmaktadır [2]. 51CrV4 çeliği krom ve vanadyum içeren, ısıl işlem görebilen, düşük alaşımlı bir çeliktir. Isıl işlem görmüş durumda yüksek mukavemet elde edilmekte ve bu mukavemeti de

korumaktadır [5-7]. Kubit ve ark. (2016), 51CrV4'ten yapılan numunelere su verme işleminden sonra yorulma mukavemetini ve mekanik özellikleri geliştirilmesi konusunda çalışmışlardır. Araştırma, kullanılan teknolojik işlemlerin mekanik özelliklerin yanı sıra yorulma dayanımı sınırını arttırdığını göstermiştir [5]. Brinic ve ark. (2018), 51CrV4 çeliğinin farklı sıcaklıklarda nihai gerilme mukavemeti (770 MPa / 20 °C; 98 MPa / 700 °C) ve akma mukavemetini (642 MPa / 20 °C; 60 MPa / 700 °C) belirlemek üzere araştırmalar yapmışlardır. Şekil değiştirme diyagramları ve sıcaklıklara karşı değişikliklerinin geometrik gösterimi üzerine çalışmışlardır [8]. Dlouhy ve ark. (2016), beynitin, perlit gibi küreselleştirilebileceğini göstermiş, 51CrV4 yay çeliğinin beynitik yapısının hızlı karbür küreselleşmesini açıklamıştır. 51CrV4 çeliğinin çok iyi özelliklere ve ısıl işlem performansına sahip olduğu ve yay çeliği olarak kullanıldığı bilinmektedir. Yapılan çalışma ile mevcut testere bıçağı çeliğinin özelliklerini geliştirmek için, 51CrV4 çeliği elmas kaynaklı testere bıçağı matrisinin üretimi için yenilikçi bir şekilde geliştirilmiştir [9].

birimi, östenit tane sınırlarında çekirdeklenmektedir. Büyüme ani ve yer değiştirmelidir. Ayrıca östenitin plastik deformasyonu nedeniyle durmaktadır. Beynitik-ferrit başlangıçta karbon ile aşırı doymuş bir yapıdadır. Kalıntı östenit içine difüzyonu engellenen karbon, burada karbürler oluşturabilir. Dönüşüm sıcaklığının düşük olması nedeniyle difüzyon yeterli seviyede gerçekleşmiyorsa, karbon, beynitik ferrit alt birimi içinde karbürler şeklinde doğrudan çökebilir. Beynitik alt-birimler oluştuktan sonra, beynit oluşumu, daha önce oluşturulmuş alt-birimlerin ucunda yeni alt-birimlerin otokatalitik çekirdeklenmesi ve yer değiştirme büyümesiyle devam edebilir. Karbonun yanı sıra, Mn, Cr gibi ikame alaşım elementlerinin ve beynit oluşumunu farklı şekillerde etkilediği bilinmektedir. Bu elementlerin çelikte bulunması, çözünen bir sürüklenme etkisi indükleyerek, beynitin büyümesini yavaşlatır ve ayrıca belirli bir sıcaklıkta izotermal bir işlemde elde edilebilen maksimum beynit fraksiyonunu sınırlayabilir [10].

Çeliklerde az miktarda vanadyum içeriği, darbe dayanıklılığını önemli ölçüde artırmaktadır [11]. Ayrıca çelikte tane büyümesini engellemektedir [12]. Vanadyumun alaşım elementi olarak çelikte bulunması, yüksek dayanım değerlerine sahip olmasını sağlamaktadır. Bu alaşım elementinin oluşturmuş olduğu V(CN) gibi çökelti dislokasyonların hareketini engelleyerek malzemenin dayanımını arttırmaktadır [13].

Yapılan çalışmada, 51CrV4 çeliklerine yağda soğutma işleminden sonra farklı sıcaklıklarda temperleme işlemleri uygulanmış ve bu işlemlerin morfolojiye, mekanik özelliklere ve aşınma dayanımlarına etkisi incelenmiştir.

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

Tablo 1'de çalışmada kullanılan 51CrV4 malzemesinin kimyasal kompozisyonu verilmektedir. 51CrV4 numunelere 970 °C 'de 30 dakika boyunca tavlama işlemi yapılmıştır. Yağda soğutma işlemi yapıldıktan sonra ilk numune grubuna 220 °C 'de 120 dakika menevişleme işlemi yapılmıştır. İkinci numune grubuna ise, 315 °C 'de 120 dakika menevişleme işlemi yapılmıştır. Isıl işlem uygulanan numuneler testler için standart ölçülere getirilmiş ve böylece mikroyapı, çekme testi, charpy darbe testi ve aşınma testi numuneleri hazırlanmıştır. Kullanılan alaşıma ait mekanik özellikler Tablo 2'de verilmiştir.

**Tablo 1.** 51CrV4 kimyasal kompozisyonu

<i>Element</i>	<i>C</i>	<i>Si</i>	<i>Mn</i>	<i>P</i>	<i>S</i>	<i>Cr</i>	<i>V</i>
% ağı.	0,47	0,40	0,70	0,025	0,025	0,90	0,10

**Tablo 2.** 51CrV4 alaşımının mekanik özellikleri [14]

<b>Çekme Dayanımı (MPa)</b>	<b>Akma Dayanımı (MPa)</b>	<b>Uzama (%)</b>
700	550	9

Yüzey morfolojilerinin incelenebilmesi için Nikon Eclipse LV150 markalı optik mikroskop ve bu mikroskoba ait Clemex yazılımı ve ZEISS marka Gemini Sigma 300 VP taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve bu cihaza ait enerji dağıtım spektrumu (EDS) kullanılmıştır. SEM görüntüleri alınırken 15 kV hızlandırma gerilimi kullanılmıştır.

X-Işını Difraksiyonu (XRD) analizi ise Malvern PANalytical marka cihaz kullanılarak 1.5418 (Å) CuK $\alpha$  dalgaboyu ile 2 $\theta$  10° to 80° arasında 0.02 °s adım aralığı ile taranmıştır. Taramalarda 40 kV ve 30 mA kullanılmıştır.

Charpy darbe testi ASTM E23-18 e göre ve çekme testi ASTM E8:2016 standardına göre gerçekleştirilmiştir.

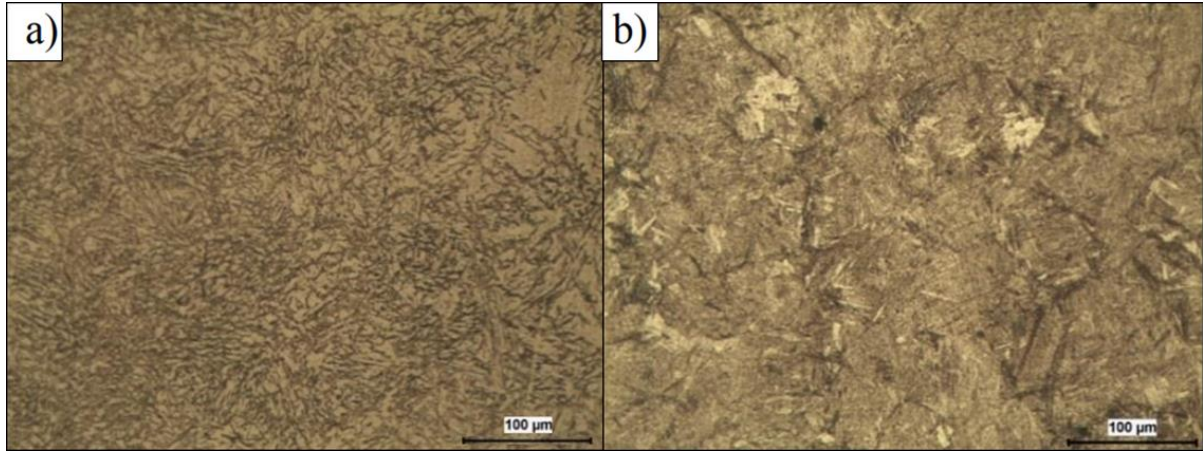
Aşınma testleri 130 N yük ve 300 g/dk kum akışında ASTM G65-04 standardına göre uygulanmıştır. Test cihazı, aşınmaya dayanıklı kauçuk kaplı paslanmaz çelik döner disk ile numunenin bağlanacağı bir koldan meydana gelir. 90 rpm hızla dönen ve çapı 228,6 mm olan bu tekerlek, tekerlek ve numune arasına 50/70 AFS ölçülerinde silika kum akışı olacak şekilde numuneye yük uygular. 30 dakika boyunca bu şekilde 300 g/dk kum akışı ile numuneler abrazif aşınmaya maruz bırakılmıştır. Test öncesi hassas terazi ile ağırlık ölçüm hassasiyeti için 0,1 mg hassasiyetindeki terazi ayarlanmış olup, test öncesi ve test sonrası ağırlıklar ölçülmüştür. Bütün numunelerin aşınma testi sonucuna göre ağırlık kayıpları karşılaştırılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar Şekil 1’de özetlenmiştir.

**Şekil 1.** Deneysel çalışmaların şematik gösterimi

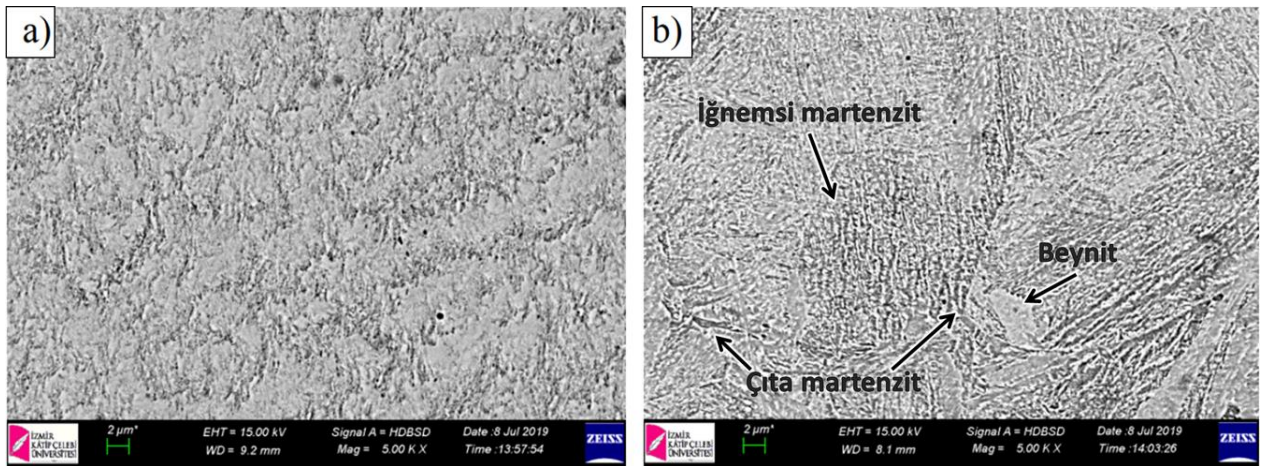
### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Malzemelere uygulanan farklı menevişleme işlemlerinin mikroyapılarına olan etkileri Şekil 2’de gösterilmiştir. 51CrV4 malzemelerinin mikroyapı ve Şekil 3’te verilen SEM görüntüleri incelendiğinde menevişleme sıcaklığının artması ile karbür artışı meydana gelmiş ve karbürler ferrit içerisinde dağılmış şekilde olduğu görülmektedir. Sıcaklığın artışı ile bu çeliklerde beynit ve martenzit yapıların arttığı bilinmektedir [15]. Bu yapılar 315 °C sıcaklıkta meneviş işlemi uygulanan Şekil 2.b ve 3.b’de gözlemlenen yapılar ile uyumluluk göstermektedir. Çıta martenzit, beynit ve iğnemsiz martenzit içeren bu yapılar Zhang ve ark. (2018) yaptıkları çalışmada da gözlemlenmiştir [16]. Daha yüksek sıcaklıkta

temperlenen 51CrV4 çeliklerindeki izotermal işlemden sonra beynit morfolojisi daha düşük sıcaklıkta temperlenen çeliklere göre farklıdır. Beynitik ferrit plakaların şekli ise asiküler değildir; karbürler daha kaba ve trombosit sınırlarında bulunur [10].

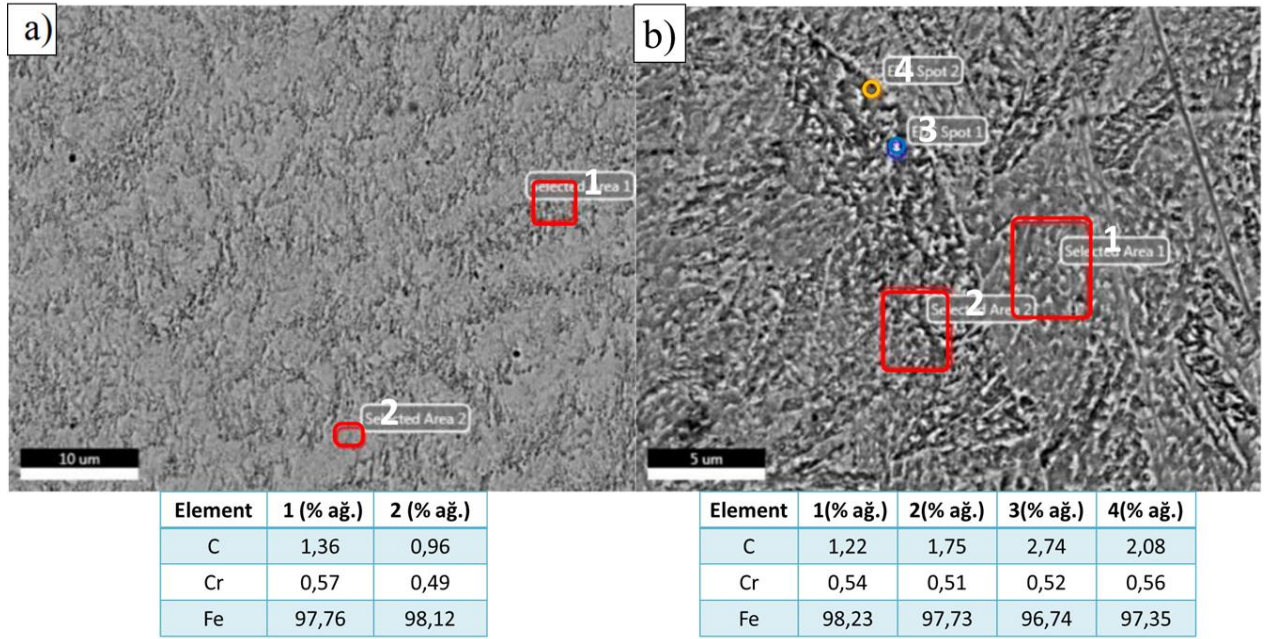


**Şekil 2.** Farklı işlemler görmüş 51CrV4 malzemesinden numunelerin mikroyapıları **a)** 51CrV4-220 °C - 20X büyütme (100 µm) **b)** 51CrV4-315 °C - 20X büyütme (100 µm)



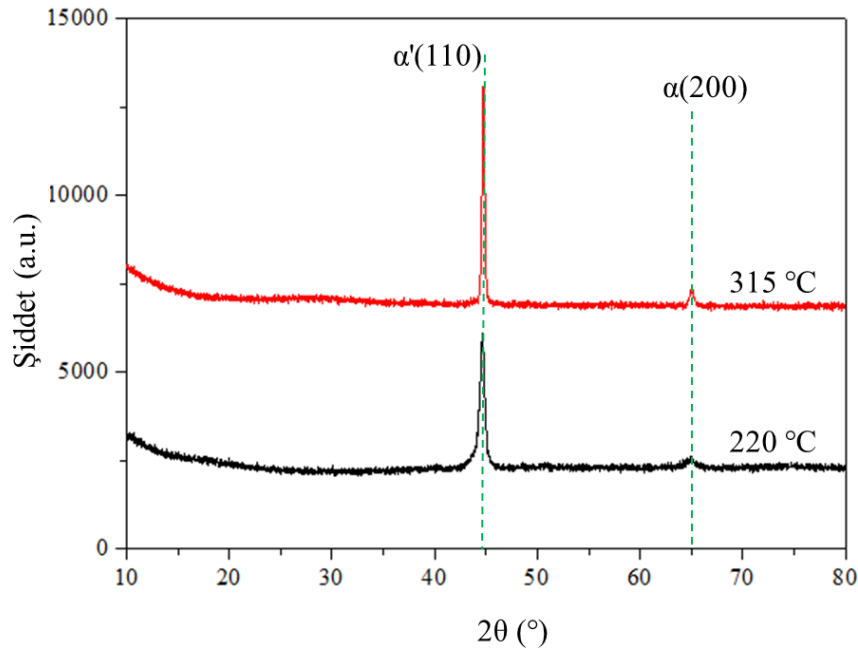
**Şekil 3.** Farklı işlemler görmüş 51CrV4 malzemesinden numunelerin SEM Görüntüleri **a)** 51CrV4-220°C **b)** 51CrV4-315°

Şekil 4'te verilen EDS analizleri incelendiğinde, Cr elementlerinin homojene yakın bir dağılım gösterdiği fakat C elementinin belirli bölgelerde oluşan karbürler neticesinde bazı heterojenlikler mevcut olduğu görülmüştür. Şekil 4.a'da koyu renk ile görüntülenen kısımlarda karbon miktarının diğer bölgelere oranla daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Bu bölgelerde ferritik matris içinde karbürlerin çökelmiş olabileceği düşünülmektedir [10,15]. Şekil 4.b'de ise 3 ve 4 numaralı bölgelerde, diğer bölgelere kıyasla C elementi miktarında artış gözlemlenmiştir. Transformör seçimi ve tasarım işleminde, transformörün çıkış gücü, çalışma frekansı ve elde edilmesi beklenen hedef verim göz önünde bulundurulmuştur. Bu amaçla seçilen transformör tasarım parametreleri Tablo 1'de verilmiştir.



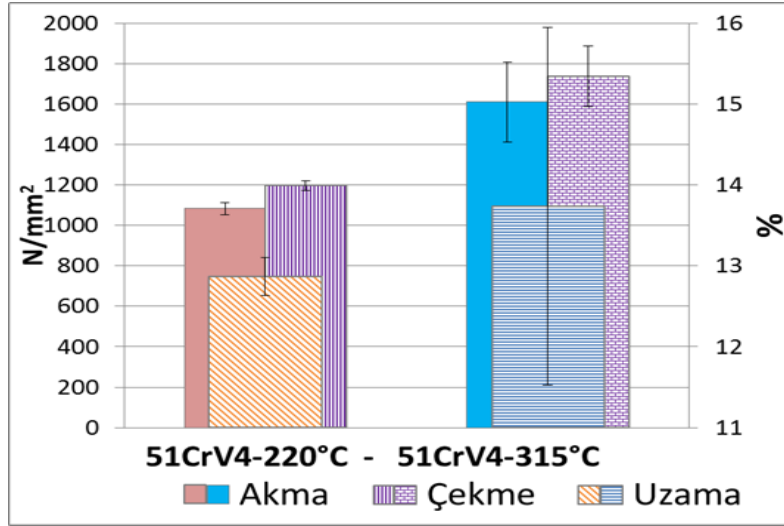
**Şekil 4.** Farklı işlemler görmüş 51CrV4 malzemesinden numunelerin SEM-EDX analiz sonuçları a) 51CrV4-220°C b) 51CrV4-315°C SEM görseli ve EDX sonuçları

Şekil 5'te farklı işlemler görmüş 51CrV4 malzemesinden numunelerin XRD grafiği verilmiştir. Grafik incelendiğinde  $\alpha'$  ve  $\alpha$ -Fe ana fazı gözlemlenmektedir. Zhang ve ark. (2018)[16], çalışmalarında da farklı sıcaklıklarda temperlenmiş 51CrV4 çeliklerinde benzer piklere rastlanmıştır. Yine aynı çalışmada, 90°C sıcaklıkta temperleme işlemi gerçekleştirilen numunelerde bu fazlara yani  $50^\circ 2\theta$  değerindeki pike rastlanabilir. XRD analizinden temperlenen 51CrV4 malzemelerinde  $2h = 44.803$ 'teki tepe martenzit fazına ve  $2h = 65.023$  tepe noktasında ferrit fazına atanmıştır [16]. Oluşan karburlu fazlar, karbon pik şiddetinin demire göre çok düşük olması nedeni ile gözlemlenememiştir. Literatürden, ferritin daha yumuşak bir faz ve martenzitin daha sert bir faz olduğu iyi bilinmektedir. Çekme, çentik darbe ve aşınma dayanımlarında ferrit yumuşak yapısından dolayı toklukla birlikte artış olduğu görülmektedir.



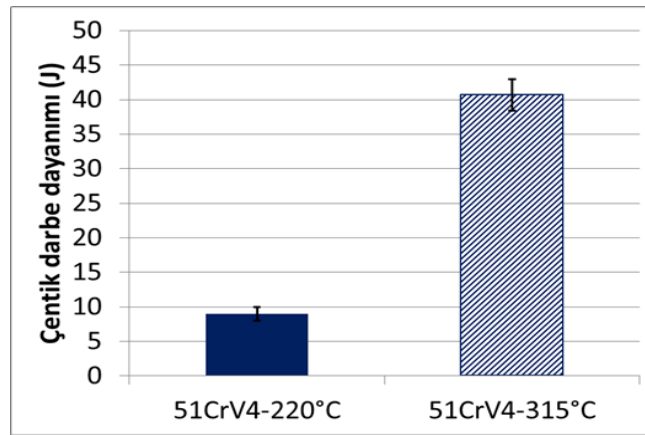
**Şekil 5.** Farklı işlemler görmüş 51CrV4 malzemesinden numunelerin XRD grafiği

Yapılan çekme testleri sonucu elde edilen akma ve çekme mukavemetleri ve % uzama değerleri Şekil 7'de gösterilmiştir. Kubit ve ark. (2016), yaptıkları çalışmada farklı işlemler uyguladıkları 51CrV4 çeliklerinin mekanik özelliklerini değerlendirmişlerdir. 480 °C'de temperleme işlemi uyguladıkları numunede  $1217 \pm 10$  MPa akma gerilmesi,  $1260 \pm 2$  MPa çekme gerilmesi ve  $5,6 \pm 0,3$  toplam uzama değerleri elde edildiği gözlemlenmiştir [5]. 315 °C' de menevişleme işlemi yapılmış numunedeki çekme testi sonucunda elde edilen dayanım değerlerinin 220 °C' de menevişleme işlemi yapılmış numuneye göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Yay çeliklerine uygulanan menevişleme işlemleri genellikle 300-500 °C aralığında tercih edilmektedir [17]. 51CrV4 için 220 oC' de gerçekleştirilen menevişleme işleminin yeterli olmadığı düşünülmektedir.



**Şekil 6.** Farklı işlemler uygulanmış 51CrV4 malzemelerin çekme testi sonuçlarını gösteren grafik

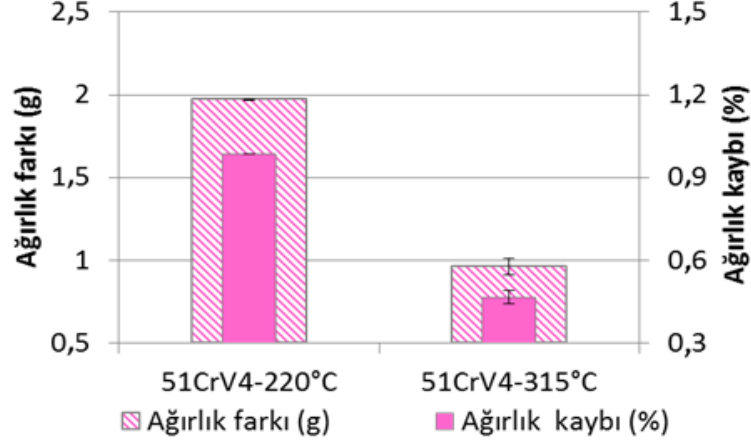
Şekil 7'de farklı sıcaklıklarda temperleme işlemleri uygulanmış 51CrV4 grubu çeliklerin çentik darbe dayanımı grafikleri görülmektedir. Sıcaklığın mekanik özelliklere olan etkisi sertlik bakımından incelendiğinde numunelerin sertlik değerlerinde çok büyük bir fark görülmesi de, çentik darbe dayanımları incelendiğinde daha yüksek sıcaklıkta menevişleme işlemi uygulanan numunenin darbe dayanımının ve dolayısı ile tokluğun daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. İzotermal beynitik dönüşüm sırasında mevcut gerilme durumunun, çatlak büyüme yönü, faz dönüşümüne tabi tutulan orijinal numunenin yükleme eksenine dik olduğunda, eşik seviyesine yakın rejimdeki çatlak yayılma davranışı üzerinde güçlü bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir [18].



**Şekil 7.** Farklı işlemler uygulanmış 51CrV4 grubu çeliklerin çentik darbe dayanımları grafiği

Numunelere uygulanan kuru kum kauçuk aşınma testi sonucu ağırlık farkları ve % ağırlık kayıpları Şekil 8'de verilmiştir. 51CrV4 e 220°C' de menevişleme uygulanmış numunelerin aşınma testi öncesi ve sonrası ortalama ağırlık farkı 1,97 g ve ortalama yüzde kayıp % 0,985 olarak hesaplanmıştır. 51CrV4 e

315°C’ de menevişleme uygulanmış numunelerin aşınma testi öncesi ve sonrası ortalama ağırlık farkı 0,97 g ve ortalama yüzde kayıp % 0,47 olarak hesaplanmıştır. Sünek yapının içinde sert fazların olduğu bir yapıda 315 °C’ de menevişlenmiş numunede aşınma direnci, çentik darbe testi sonucunda tokluğun düşük gevrek bir yapıya sahip olan 220 °C’ de menevişlenen numuneye göre daha yüksek elde edilmiştir.



**Şekil 8.** Farklı işlemler görmüş 51CrV4 malzemesinden numunelerin aşınma grafiği

#### 4. SONUÇ (CONCLUSION)

Yapılan çalışmada, 51CrV4 çelik numunelere, 970 °C’de tavlandıkları sonra yağda soğutma işlemi ve ardından 220 °C ve 315 °C sıcaklıklarda 120 dk süre ile menevişleme işlemleri uygulanmıştır. Bu işlemlerin morfolojiye, mekanik özelliklere ve aşınma dayanımlarına etkisi incelenmiştir.

Yapılan incelemeler sonucunda iki farklı menevişleme sıcaklığında yapılan işlemler sonucunda numunelerde ferritik yapı içinde dağılmış halde karbür içeren ve beynitik bir yapıda iki farklı mikroyapıya rastlanmıştır. Yapılan EDS analizleri ile Cr elementlerinin homojene yakın bir dağılım gösterdiği, fakat C elementinin belirli bölgelerde oluşan karbürler neticesinde bazı heterojenliklerin mevcut olduğu görülmüştür. XRD analizi sonucunda martenzit ve ferrit fazlarının piklerine rastlanmıştır ve ferrit fazının yapıda bulunması, çekme, çentik darbe ve aşınma dayanımlarında numunelerin, ferrit yumuşak yapısından dolayı toklukla birlikte artış göstermesine neden olmuştur. 51CrV4 numunesinde menevişleme sıcaklığının artışı sertliğini çok etkilemese de, çentik darbe dayanımını ve aşınma direncini arttırmıştır. 220 °C’ de menevişleme işlemi uygulanmış numunedeki aşınma dayanımının, numuneden büyük parçaların koparak ayrılması sonucu daha az olduğu tespit edilmiştir. 315°C’ de menevişlenmiş numunede tokluğun daha yüksek olduğu tespit edilmiş ve aynı zamanda bu numunede 220 °C’ de menevişlenmiş numuneye göre daha yüksek bir aşınma direnci elde edilmiştir.

#### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Yazarlar, bu çalışmadaki malzeme temini ve ısıl işlemlerin gerçekleştirilmesindeki katkılarından dolayı Halit Ünlü Ziraat Aletleri Zirai ürünler San. ve Tic. A.Ş. firmasına teşekkür ederler.


#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Boccalini, M., Goldenstein, H. Solidification of high speed steels. International Materials Reviews, 46(2)(92–115), (2013).
- [2] Chen, R., Wang, Z., Zhu, F., Zhao, H., Qin, J., Zhong, L. Effects of rare-earth micro-alloying on microstructures, carbides, and internal friction of 51CrV4 steels. Journal of Alloys and Compounds, 824(153849), (2020).



- [3] Zhu, J., Zhang, Z., Xie, J. Improving strength and ductility of H13 die steel by pre-tempering treatment and its mechanism. *Materials Science and Engineering: A*, 752(101–114), (2019).
- [4] Śledź, M., Stachowicz, F., Zielecki, W. The effect of shot peening on the fatigue strength of steel sheets. *Redakcia Kovove Materialy, Kovove Materialy-Metallic Materials*, 2 (53)(91-95), (2015).
- [5] Kubit, A., Bucior, M., Zielecki, W., Stachowicz, F. The impact of heat treatment and shot peening on the fatigue strength of 51CrV4 steel, 21st European Conference on Fracture (ECF), Catania, Italy, 24.6.2016, (ECF21), *Book Series: Procedia Structural Integrity*, 2(3330–3336), (2016).
- [6] Göken, J., Maikranz-Valentin, M., Steinhoff, K., Golovin, I. S., Ivleva, T. V., Flejszar, A., Riehemann, W. Mechanical spectroscopy study of thermo-mechanically treated 51CrV4 steel. *Materials Science and Engineering: A*, 521-522(335–339), (2009).
- [7] Zabel, A., Rödder, T., Tiffe, M. Material testing and chip formation simulation for different heat treated workpieces of 51CrV4 steel, 16th CIRP Conference on Modelling of Machining Operations, Burgundy, France 15.06.2017, *Procedia CIRP* 58, 181 – 186, (2017).
- [8] Brinic, J., Brcic, M., Krscanski, S., Lanc, D., Niu, J., Wang, P. Steel 51CrV4 under high temperatures, short-time creep and high cycle fatigue. *Journal of Constructional Steel Research*, 147(468-476), (2018).
- [9] Dlouhy, J., Hauserova, D., Motycka, P. Bainite austenitization in 51CrV4 spring steel: Accelerated cementite spheroidisation, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 179 (2017), 1, Article number 012016, 4th International Conference Recent Trends in Structural Materials, COMAT, (2016).
- [10] Goulas, C., Kumar, A., Mecozzi, M.G., Castro-Cerda, F. M., Herbig, M., Petrov, R. H., Sietsma, J. Atomic-scale investigations of isothermally formed bainite microstructures in 51CrV4 spring steel. *Materials Characterization*, 152(67-75), (2019).
- [11] Pant, G., Singh, A. P., Sharma, H. K., Cooling rate characteristics of vanadium based micro alloyed steel, *Materials Today Proceedings*, 26(2)(1087-1090), (2020).
- [12] Karabulut, H., Türkmen, M., Temperleme işleminin tozaltı kaynak yöntemi ile birleştirilen mikroalaşımli çeliklerin mekanik özelliklerine etkisi, *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 7(3)(587-594), (2016).
- [13] Çalığülü, U., Aras, M., Türkmen, M. Temperleme işleminin yağda soğutulan çeliklerin mikroyapı ve sertlik özelliklerine etkisi. In 4th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science (ISITES), Antalya, Turkey, 3-5.11.2016, ISITES2016.
- [14] Uslular Hadde ®, [www.uslularhadde.com](http://www.uslularhadde.com)
- [15] Hauserova, D., Dlouhy, J., Kotous, J. Structure refinement of spring steel 51CrV4 after accelerated spheroidisation." *Archives of Metallurgy and Materials*, 62, 2017.
- [16] Zhang, L., Gong, D., Li, Y., Wang, X., Ren, X., Wang, E. Effect of Quenching Conditions on the Microstructure and Mechanical Properties of 51CrV4 Spring Steel, *Metals*, 8(1056), (2018).
- [17] Bodycote ® [www.bodycote.com](http://www.bodycote.com)
- [18] Lambers, H.-G., Gorny, B., Tschumak, S., Mainer, H. J., Canadic, D. Crack growth behavior of low-alloy bainitic 51CrV4 steel. *Procedia Engineering*, 2(1373–1382), (2010).

## Investigation of the Effects of Static Deformation Aging Treatment on the Tensile Strength of a Plain Carbon Powder Metal Steel

 Onur Altuntaş<sup>1,\*</sup>  Emine Kübra Özer<sup>2</sup>  Ahmet Güral<sup>2</sup> 
<sup>1</sup>Gazi University, Vocational School of Technical Sciences, Machine and Metal Technologies Department, 06500, Yenimahalle/ANKARA

<sup>2</sup>Gazi University Faculty of Technology, Department of Material and Metallurgy Engineering, 06500, Yenimahalle/ANKARA

### Graphical/Tabular Abstract

In this study, the effect of annealing temperatures on the deformation aging of 0.4% C steels produced by conventional Powder Metallurgy (PM) method was investigated. After aging deformation, powder metal steels; microstructure, hardness, broken surface and tensile properties were investigated.

#### Article Info:

Research article  
 Received: 25/04/2020  
 Revision: 07/07/2020  
 Accepted: 11/08/2020

#### Highlights

- Tensile Strength

#### Keywords

Deformation aging  
 Powder metallurgy steel  
 Fracture surface



Figure A. Schematic representation of the production and characterization processes

**Purpose:** The purpose of this study is to investigate the static deformation aging behaviors at different temperatures of powder metal steels

**Theory and Methods:** Micro tensile test samples were produced by shaping the obtained powder mixtures at room temperature and at a pressure of 700 MPa in a single-axis mold. Then it was left to sintering for 30 minutes under an atmosphere of pure argon gas at 1180 °C. 4% pre-deformation was applied to the medium carbon powder metal steels produced after sintering. Then, aging treatment of 30 minutes was carried out at 200, 300 and 400°C temperatures, respectively. After aging deformation, powder metal steels; microstructure, hardness, broken surface and tensile properties were investigated.

**Results:** It was determined that the yield strength decreased as the annealing temperature applied after 4% pre-deformation increased. As the static deformation temperature increases, the elongation amount and the hardness values were decreased all of specimens

**Conclusion:** Studies have shown that the results of static deformation aging behavior at 0.4% C steels produced by powder metallurgy method are compatible the mechanical tests



## Sade Karbonlu Toz Metal Bir Çeliğin Çekme Dayanımına Statik Deformasyon Yaşlanma İşleminin Etkilerinin Araştırılması

Onur Altuntaş<sup>1,\*</sup> Emine Kübra Özer<sup>2</sup> Ahmet Güral<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Gazi Üniversitesi Teknik Bilimler M.Y.O. Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, 06500, Yenimahalle/ANKARA

<sup>2</sup>Gazi Üniversitesi Teknoloji Fak. Metalurji ve Malzeme Müh. Bölümü., 06500, Yenimahalle/ANKARA

### Öz

Bu çalışmada Toz Metalurjisi (TM) yöntemi ile üretilmiş % 0,4 C'lu çeliklerin deformasyon yaşlanması üzerine tavlama sıcaklıklarının etkisi incelenmiştir. Bu amaçla saf demir tozuna, ağırlıkça % 0,4 oranında doğal grafit tozu ve yağlayıcı olarak ise ağırlıkça % 0,3 çinko stearat ilave edilmiştir. Elde edilen toz karışımları, oda sıcaklığında ve tek etkili kalıpta 700 MPa presleme basıncında şekillendirilerek mikro çekme test numuneleri üretilmiştir. Ardından 1180 °C sıcaklıkta saf argon gazı atmosferi altında 30 dk boyunca sinterlenme işlemine bırakılmıştır. Sinterlenme işlemi sonrasında üretilen orta karbonlu toz metal çeliklere %4 oranında ön deformasyon uygulanmıştır. Ardından sırasıyla 200, 300 ve 400 °C sıcaklıklarda 30 dakika süre yaşlandırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Yapılan deformasyon yaşlanması sonrası, toz metal çeliklerin; mikroyapı, sertlik, kırık yüzey ve çekme özellikleri araştırılmıştır. Statik deformasyon sonucunda en yüksek akma dayanımı ve sertlik değeri 200 °C'de statik deformasyon yaşlanması uygulanan numunelerde görülmüştür.

### Makale Bilgisi

Araştırma makalesi  
Başvuru: 25/04/2020  
Düzeltilme: 07/07/2020  
Kabul: 11/08/2020

### Anahtar Kelimeler

Deformasyon yaşlanması  
Toz metalurjisi çelik  
Kırık yüzey

### Keywords

Deformation aging  
Powder metallurgy steel  
Fracture surface

### Investigation of the Effects of Static Deformation Aging Treatment on the Tensile Strength of a Plain Carbon Powder Metal Steel

### Abstract

In this study, the effect of annealing temperatures on the deformation aging of 0.4% C steels produced by Powder Metallurgy (PM) method was investigated. For this purpose, 0.4% by weight natural graphite powder and 0.3% by weight zinc stearate are added to pure iron powder. Micro tensile test samples were produced by shaping the obtained powder mixtures at room temperature and at a pressure of 700 MPa in a single-axis mold. Then it was left to sintering for 30 minutes under an atmosphere of pure argon gas at 1180 °C. 4% pre-deformation was applied to the medium carbon powder metal steels produced after sintering. Then, aging treatment of 30 minutes was carried out at 200, 300 and 400°C temperatures, respectively. After aging deformation, powder metal steels; microstructure, hardness, broken surface and tensile properties were investigated. As a result of static deformation, the highest yield strength and hardness value were seen in the samples where static deformation aging at 200 °C was applied.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

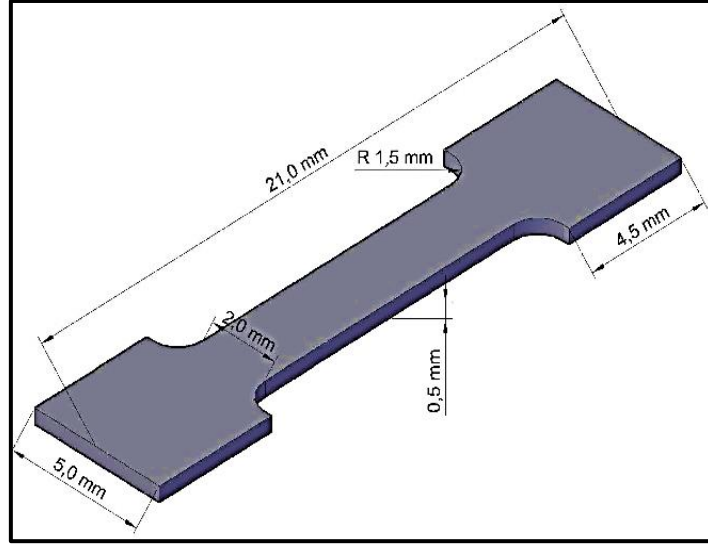
Deformasyon yaşlanması, özellikle düşük karbonlu çeliklerde (ferritik çelikler) gözlemlenen akma noktası olayı ile yakından ilişkili olan bir tür mekanik davranıştır [1]. Yaşlanma sertleşmesi, karbon (C) ve azot (N) gibi arayer atomlarının dislokasyonların hareketini engellemesiyle metal ve alaşımların mekanik özelliklerinin değişmesidir [2-4]. Mekanik özelliklerdeki değişim plastik deformasyondan sonra meydana geliyorsa bu durum statik yaşlanma sertleşmesi olarak adlandırılır. Eğer yaşlanma sertleşmesi olayı plastik deformasyon sırasında meydana geliyorsa bu dinamik yaşlanma sertleşmesi olarak tanımlanır [5,6]. Statik yaşlanma sertleşmesi, plastik deformasyondan sonra meydana gelen yaşlanma olarak tanımlanabilir. Statik yaşlanma sertleşmesinin etkisi, akma gerilmesinde bir artış ve % uzamada bir düşüş olarak görülmektedir. Bu etkilere hareket eden dislokasyonlar ve onları kilitleyen karbon ve azot arayer atomlarının neden olduğu kabul edilmektedir [7]. Akma noktasındaki bu artış, statik yaşlanma sertleşmesinin en önemli göstergesi

olarak kabul edilir [8-9]. Yaşlanma sertleşmesi olayı çeliklerin sünek/gevrek geçiş sıcaklığını, yüksek sıcaklık dayanımını, elektriksel ve manyetik özelliklerini de etkileyebilir [10]. Yapılan çalışmalarda, [11,12] yaşlanma sertleşmesinin etkisini azaltmak için, katı çözeltilerde arayer atomlarının oranını % 0,0001'den aşağıya düşürülmesi gerektiğini ve arayer atomlarının % 0,002 oranında olduğunda yaşlanma olayının maksimuma ulaştığını belirtmişlerdir. Ayrıca, Gündüz ve Kaçar C-Mn-Al-V-N mikroalaşım çeliğinde yaşlanma sertleşmesinin oluştuğunu ve özellikle havada soğutulan numunelerin herhangi bir ısıl işlem görmemiş numunelere göre daha fazla statik yaşlanmaya maruz kaldığını göstermişlerdir [13]. İş makinelerinin jant üretiminde kullanılan S275JRC çelikleri temin edilerek yapılan bir çalışmada fabrikasyon şekliyle ve homojenleştirme + normalizasyon ısıl işlemi uygulanıp % 5 ön deforme edildikten sonra farklı sıcaklık ve zaman dilimlerinde yaşlandırılmaları sonucu optimum yaşlanma zamanı ve sıcaklığı belirlenerek yaşlanmaya bağlı olarak meydana gelen dayanım artışının yorulma dayanımını olumlu etkilediği tespit edilmiştir [14]. Otomotiv sektöründe yaygın olarak kullanılan HSLA 7136 kalite çeliğin % 3 ön deforme edilerek farklı sıcaklıklardaki deformasyon yaşlanması özelliklerinin araştırıldığı bir çalışmada en yüksek mekanik değerler, 20 dakika sürede 150 °C'de yapılan yaşlandırma işlemlerinde elde edilmiştir. Çalışma solüsyona alma ve ardından suda soğutmanın, ön deformasyonun ve yaşlandırma sıcaklığının yüksek mukavemetli düşük alaşımlı 7136 kalite çeliğin mikroyapısı ve mekanik özellikleri üzerinde etkili olduğunu göstermiştir [15].

Bu çalışmanın amacı toz metalurjisi yöntemi ile üretilen sade orta karbonlu bir çeliğin % 4 ön deformasyon sonrası farklı sıcaklıklarda yaşlandırılması sonucu sertlik ve çekme özelliklerinin mikroyapısal dönüşüm ile beraber karakterize edilmesidir.

## 2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR ( EXPERIMENTAL STUDIES)

Deneysel çalışma için Höganäs AB firması tarafından ticari olarak satın alınan elektroliz yöntemi ile üretilmiş NC 100.24 saf demir tozlarına karbon kaynağı olarak ağırlıkça % 0,4 grafit ve yağlayıcı olarak ise % 0,3 Zn stearat ilave edilmiştir. Hazırlanan bu karışım tozları 700 MPa basınçta oda sıcaklığında tek eksenli presleme ile ASTM E-08 standardına göre mikro çekme test numunesi (Şekil 1) olacak şekilde şekillendirilerek  $7,1 \text{ g.cm}^{-3}$  ortalama ham yoğunluğa sahip numuneler üretilmiş ve bu numuneler 1180 °C de Argon gaz atmosfer kontrollü fırında 30 dakika süre ile sinterlenerek  $7,08 \text{ g.cm}^{-3}$  yoğunluğunda toz metal numuneler üretilmiştir. Sinterleme işlemi sonrası % 90 teorik yoğunluğa ulaşılmıştır. Sinterleme işlemi sonrası numunelerin % 4 ön deformasyon işlemleri ile statik deformasyon yaşlandırma sonrası çekme testleri her bir parametre için üretilen 3 numunenin Instron 3369 Bilgisayar kontrollü ve 50 kN (5 ton) çekme-basma kapasitesine sahip üniversal test cihazında 1mm/dk çekme hızında koparılmaları ile gerçekleştirilmiştir. Metalografi işlem basamaklarının uygulanması amacıyla bakalite alınan numuneler sırasıyla 120-1200'lik zımparalarda zımparalayıp pürüzsüz bir yüzey elde edilmiştir. Zımparalama işlemi bittikten sonra sırasıyla 3-1 mikronluk solüsyonlar kullanarak parlatma işlemi gerçekleştirilmiştir. Mikro yapıların açığa çıkarılması amacıyla yağlayıcı olarak % 3'lük Nital çözeltisi (3ml HNO<sub>3</sub>-100ml ethanol) kullanılmıştır. Mikroyapı ve kırık yüzeylerin incelenmesinde Leica optik ve JEOL JSM-6060LV marka SEM mikroskopları kullanılmıştır. Sertlik ölçümlerde Vickers (HV 0,1) sertlik ölçme yöntemi kullanılmıştır. Numunelerin sertliğinin belirlenmesinde yüzey ve merkez bölgelerindeki 3 farklı noktadan sertlik değerleri alınarak aritmetik ortalamaları hesaplanmıştır.

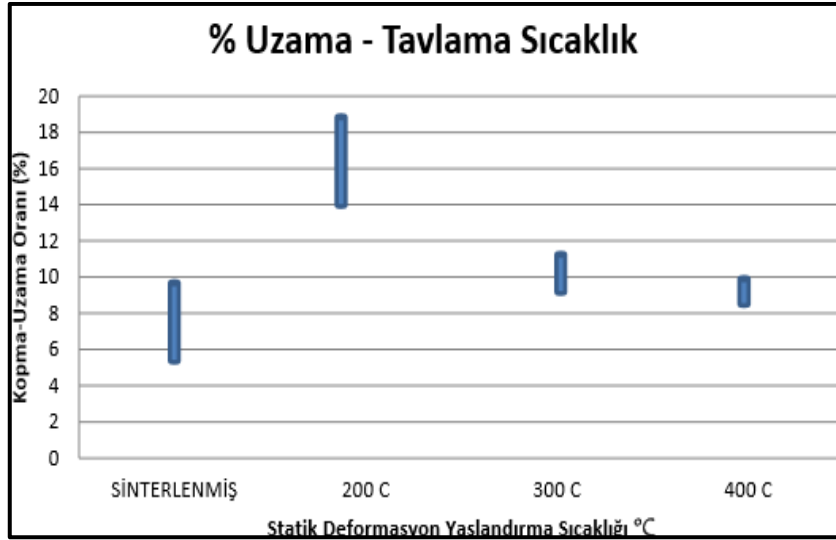


Şekil 1. Mikro çekme test numunesinin üç boyutlu çizimi ve SI sistemindeki ölçüleri

### 3. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA (EXPERIMENTAL RESULTS AND DISCUSSION)

#### 3.1. Statik Deformasyon Yaşlanması Sonuçları (Static Deformation Aging Results)

Geleneksel toz metalurjisi prosesleri uygulanarak üretilen ve ardından % 4 ön gerinim uygulanarak 200, 300 ve 400 °C sıcaklıklarda yaşlandırılmış numuneler, çekme test cihazında 1 mm/dk sabit çekme hızında çekilmesi ile aşağıdaki grafikler elde edilmiştir.



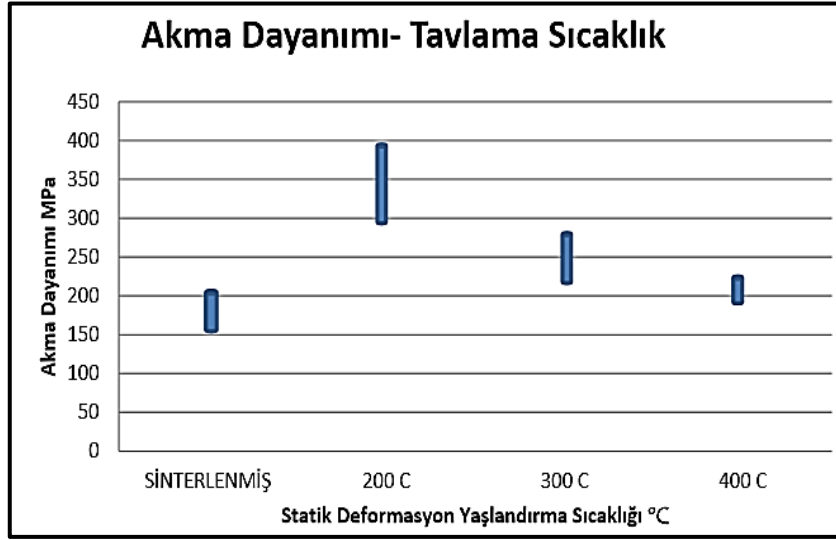
Şekil 2. Statik deformasyon yaşlandırma sıcaklığına bağlı % kopma-uzama değişimleri

Şekil 2'deki grafikten de görüleceği üzere sinterlenmiş numuneye uygulanan statik deformasyon yaşlanma işleminin % uzama oranında belirgin bir artışa neden olduğu görülmüştür. Bu durum öncelikle beklenmeyen bir özellik olarak görülmektedir. Çünkü bu işlem esnasında arayer atomlarının dislokasyonlar etrafında Cottrell atmosferi oluşturmasından kaynaklanan bir dayanım artışı ve % uzamada azalma beklenir. Ancak düşük statik deformasyon yaşlanma sıcaklığı olan 200 °C'de, en yüksek % uzama miktarı elde edilmiştir. Bu durum, bu sıcaklıkta Cottrell etkisi henüz devreye girmeden önce ön gerinim uygulanan malzemenin yeniden kristalleşme sürecine girmiş olabileceğini göstermektedir.

Bilindiği gibi ön gerinim uygulanan, yani soğuk plastik deformasyon uygulanmış malzeme yeniden kristalleştirildiğinde % uzama değerleri artabilir. Ancak bu çalışmada kullanılan Fe esaslı bu alaşım için 200 °C yeniden kristalleşme sıcaklığı için etkisiz bir sıcaklıktır.

Şekil 2'deki sonuçlar incelendiğinde tavlama sıcaklığı ile % uzama miktarı arasında ters orantı gözlenmiştir. Tavlama sıcaklığı ne kadar yüksek olursa, % uzama miktarı o derece düşük olmuştur. Bu nedenle en düşük % uzama miktarı, sinterlenmiş numuneden sonra, 400 °C sıcaklıkta statik deformasyon ile yaşlandırılan numunelerde görülmüştür.

Bu sonuçlar, zaten statik deformasyon yaşlanma sıcaklığı ile Cottrell etkisini sağlayacak arayer C atomunun yayılımının hızlanmasını sağladığından, dislokasyon hareketleri çok erken zamanda ve etkili bir şekilde engellenmesiyle % uzama değerleri azalmıştır. Bu durum aynı zamanda dinamik gerinim yaşlanması işleminde de karşılaşılan bir durumdur. Bir çalışmada DP600 çelikleri 400 °C civarlarında çekme testi uygulandığında, çekme değerleri artarken % uzama değerlerinin düştüğü bildirilmiştir [16].

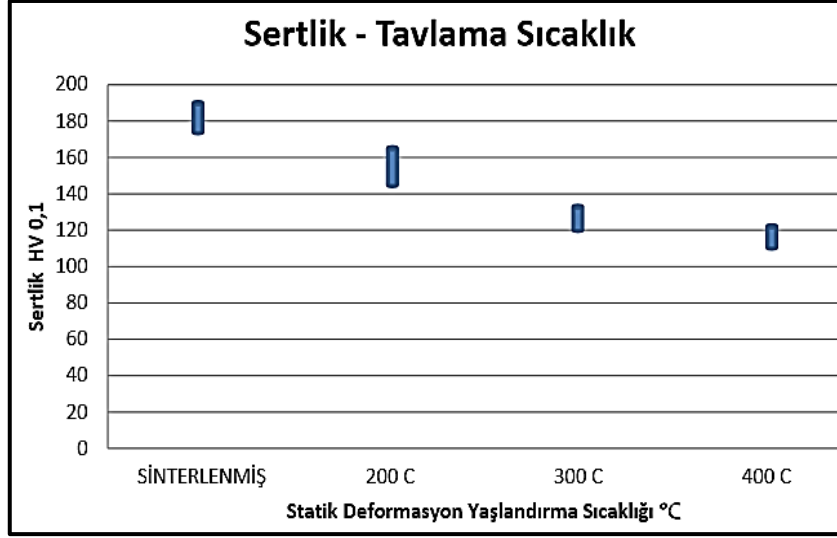


Şekil 3. Statik deformasyon yaşlandırma sıcaklığına bağlı akma dayanımı değişimleri

Yapılan statik deformasyon yaşlandırma işlemleri sonrasında Şekil 3'deki grafikten de görüleceği üzere, sinterlenmiş numuneye göre genel olarak akma dayanımlarında bir artış görülmüştür. Akma dayanımları incelendiğinde en yüksek akma değeri en düşük statik deformasyon sıcaklığı olan 200°C'de görülmüştür. Statik deformasyon sıcaklığı arttıkça akma dayanımı azalmıştır. En düşük akma dayanımı 400°C'de elde edilmiştir. Literatüre bakıldığında statik deformasyon uygulanan farklı malzemelerde artan statik deformasyon sıcaklığı ile akma dayanımlarında azalma görülürken % uzama miktarlarında artış görülmüştür. Ancak bu çalışmada akma dayanımı azalırken % uzama miktarlarında da azalma görülmüştür. Şekil 3'de verilen akma dayanımı değişimleri statik deformasyon yaşlanması işlemlerinden beklenen sonucu 200 °C'de karşılamıştır. Ancak akma dayanımı değerlerinin artışı beklenirken, bu değerlerin muhtemel düşüş nedeni sıcaklığın yeniden kristalleşme sıcaklığına yakın olmasından dolayı düşünülebilir. Yine de akma dayanım değerleri % uzama değerleri ile uyumlu değildir. Bu durum ön deformasyon uygulandığında kısmen dislokasyon yoğunluğunun artışına bağlı soğuk plastik deformasyon sertleşmesinin 200 °C'de henüz toparlanmaya bağlı yumuşama etkisi (akma dayanımı) henüz gerçekleşmediğine bağlanabilir. Çünkü statik deformasyon yaşlanma sıcaklığının artışı ile akma ve sertliğin azalması, statik deformasyon yaşlanması mekanizmasından ziyade toparlanma mekanizmasının baskın olduğunu göstermiştir.

### 3.2. Sertlik Sonuçları (Hardness Results)

Statik deformasyon sıcaklıklarına bağlı olarak numunelerin sertlik sonuçları Şekil 4'de verilmiştir.

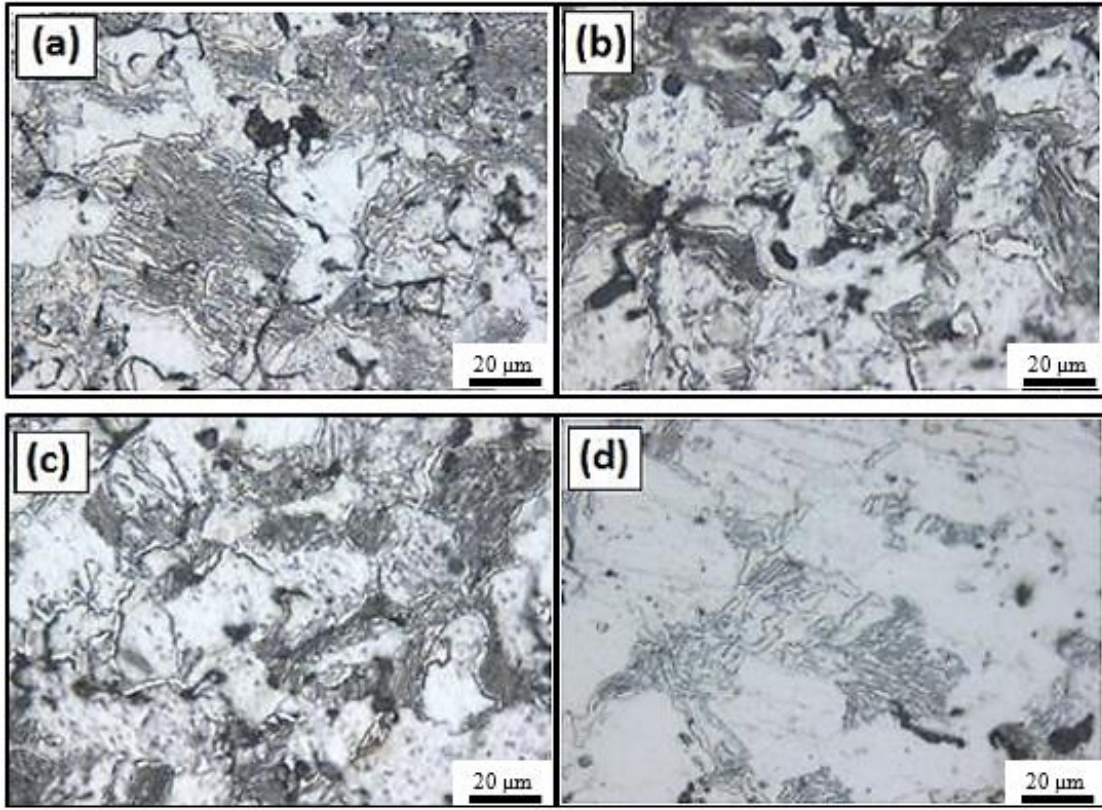


**Şekil 4.** Statik deformasyon yaşlandırma sıcaklığına bağlı sertlik değişimleri

Sinterlenmiş şartlarda sertlik değerleri ortalama 195 HV<sub>0,1</sub> iken Şekil 3'de görüldüğü üzere statik deformasyon sıcaklığı arttıkça numunelerin sertlikleri azalmıştır ve bu sertlik sonuçları akma dayanımı değerleri ile uyumludur. Ancak sinterlenmiş şartlarda sertlik ve akma değerleri uyumsuzdur. Bu durum şu şekilde açıklanabilir. Toz metalurjisi ile üretilen malzemeler gözenek barındırdığından, yarı dinamik sayılan çekme testi sırasında yükü sinterlenmiş tozlar arasındaki boyunlaşmış bölgeler taşımaktadır. Bu sinterlenmiş malzeme henüz gerilim altında değil iken sinterlenmiş boyunlar genellikle düşük akma/çekme dayanımı göstermektedir. Sertlik değerlerinin akmaya göre yüksek çıkmasının nedeni ise bu çalışmada uygulanan sertlik yükü değerlerinin düşük olması (mikro sertlik) mikro yapıda gözeneklerden uzak ve genellikle perlitik alanlardan sertlik ölçümü yapıldığından, sinterlenmiş sertlik değerleri akma dayanımına göre fazla ve uyumsuzdur. En düşük sertlik sonucu en yüksek statik deformasyon sıcaklığı olan 400 °C elde edilmiştir. 200 °C statik deformasyon sıcaklığında numune sertliği 161 HV<sub>0,1</sub> ölçülmüşken, statik deformasyon sıcaklığı 300 °C uygulandığı zaman sertlik değeri 130 HV<sub>0,1</sub> ve 400 °C ise 121 HV<sub>0,1</sub> olarak ölçülmüştür. Yapılan tüm sertlik testi sonucunda, sertlik değerlerinde normalden düşük sonuçlar görülmüştür. Bunun nedeni de toz metalurjisi ile üretilen malzemelerdeki gözeneklerdir. Numunelerimizin yoğunluğunun 7,08 – 7,1 g.cm<sup>-3</sup> olarak ölçülmüş olması da içerdiği gözeneklerden kaynaklanır.

### 3.3. Mikroyapı Sonuçları (Microstructure Results)

Aşağıdaki Resim 1'de deneysel çalışmalar bölümünde anlatıldığı gibi metalografik olarak hazırlanmış sinterlenme sonrası ile 200 °C, 300 °C ve 400 °C sıcaklıkta statik deformasyon işlemi sonrası optik mikro yapı görüntüleri verilmiştir.



**Resim 1.** Optik mikroyapı görüntüleri; (a) Sinterlenmiş (b) 200°C'de (c) 300°C'de (d) 400°C'de statik deformasyon ile yaşlandırılmış numuneler

Mikroyapı karakterizasyonları sonucunda Resim 1(a-d)'de ferrit + perlitik yapıların görüldüğü ayrıca toz metalürjisi yöntemi ile üretimin doğal bir sonucu olarak gözeneklerin de varlığı gözlemlenmiştir [17]. Mikroyapılar incelenerek sinterlenmiş numuneye ait % perlit hacim oranları hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucunda artan sıcaklık ile perlit miktarında azalma görülmüştür. Çıkan sonuçlara göre aşağıdaki Eş. 1'de verildiği gibi, ters kaldıraç kuralına göre bileşik C oranı hesaplanmıştır.

$$\text{Ortalama \% perlit oranı} = \frac{\% C - 0,025}{0,8 - 0,025}$$

$$0,47 = \frac{\% C - 0,025}{0,77}$$

$$\% C = 0,39$$

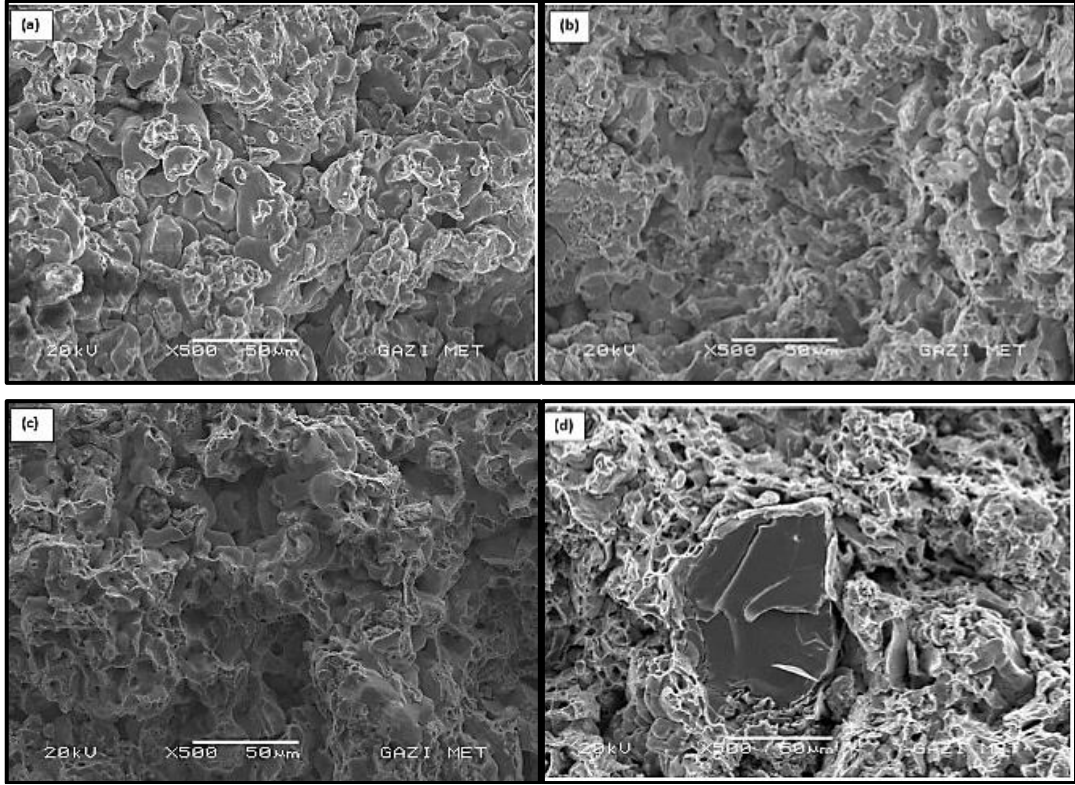
1

Çalışma sonucu grafit miktarında önemli bir azalma görülmemiştir. Bu çalışmada üretilen sade karbonlu toz metalürjisi çeliğin orta karbonlu olduğu anlaşılmıştır.

### 3.4. Kırık Yüzey İncelemeleri (Fractured Surface Investigations)

Çekme testi uygulaması sonrası kopan numunelerin, kopma yüzeylerinden kırılma tiplerini belirlemek için SEM cihazı kullanılmıştır. Elde edilen görüntüler Resim 2'de verilmiştir.





**Resim 2.** SEM kırık yüzey görüntüleri; (a) Sinterlenmiş (b) 200 °C, (c) 300 °C (d) 400 °C'de statik deformasyon ile yaşlandırılmış numuneler

Resim 2’de görüldüğü üzere sinterlenmiş, 200 ve 300°C’de yaşlandırılmış numunelerde özellikle sinterlenme bağı yapmış çekme yükünü taşıyan sinter bağlarında mikro çukurcuk kopma tipleri görülmüştür ancak 400 °C’de statik deformasyon yaşlandırılan numunede klivaj kırılma gerçekleşmiştir. Diğer sıcaklıklarda tavlama sıcaklığına göre % uzama miktarı 400 °C’de en düşük olarak görülmüştür. 200 °C’de statik deformasyon uygulanmış numunede ise en yüksek % uzama miktarı görülmüştür. SEM görüntüsündeki gözeneklerde sünek yapının işareti. Özellikle toz metalurjisi malzemelerinde olduğu gibi çekme yükünü taşıyan sinter boyunları kopmaya kadar yük taşıyabiliyorsa genellikle kopma yüzeyleri mikro çukurcukları açığa çıkartabilir. Bu mevcut gözenekler çentik etkisi yaptığından kopma için gerekli mikro çatlaklar tane içlerinden ilerleyebilir. Bu çalışmada olduğu gibi cottrell etkisi daha etkili olan 400 °C’de yaşlandırılmış numunede dislokasyon hareketlerinin engellenmesine bağlı bu hat üzerindeki düzlemsel yarılmaya neden olabilir. Bu da klivaj gibi kırılma tipi ile sonuçlanmıştır. Bu aynı zamanda kopma yüzeylerine yakın gözenek miktarları ile de orantılı olduğu düşünülebilir.

#### 4. SONUÇ (CONCLUSION)

Yapılan çalışmalar sonrasında elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi bulunmuştur;

- Toz metalurjisi yöntemi ile üretilen % 0,4 C’lu toz metalin presleme sonrası yoğunluğu  $7.1 \text{ g.cm}^{-3}$ , sinterleme sonrası ise ortalama  $7,08 \text{ g.cm}^{-3}$  olarak ölçülmüştür. 7.1
- % 4 ön deformasyon sonrasında uygulanan tavlama sıcaklığı arttıkça akma dayanımının azaldığı tespit edilmiştir.
- % Uzama miktarı, tavlama sıcaklığı arttıkça azalan akma dayanımı ile ters orantılı artması gerekirken, akma dayanımı ile doğru orantılı azaldığı görülmüştür. Statik deformasyon sıcaklığı arttıkça % uzama miktarı da azalmaktadır.
- Uygulanan statik deformasyon sıcaklığı arttıkça sertlik değerlerinin ters orantılı olarak azaldığı ölçülmüştür.

- Yapılan çalışmalar, toz metalurjisi yöntemi ile üretilen % 0,4 C'lu çeliklere statik deformasyon yaşanması uygulanabildiğini göstermiştir.

## TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışma 07/2018-05 ve 65/2019-05 numaralı projeler kapsamında Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi tarafından desteklenmektedir.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] G.E. Dieter, Mechanical Metallurgy, Mc Graw-Hill BookCompany, New York, 1961.
- [2] Chiew, S.P., Zhao, M.S. and Lee, C.K., “Mechanical properties of heat-treated high strength steel under fire/post-fire conditions”, Journal of Constructional Steel Research, 98: 12–19 (2014).
- [3] Cottrell, A. H. and Bilby, B.A., “Dislocation theory of yielding and strainageing of iron”, Proc. Phys. Soc., 62: 49-62 (1949).
- [4] Karahan, T., Ertek, E. H., Tümer, M. and Kaçar, R., “Strengthening of AISI 2205 duplex stainless steel by strain ageing”, Materials and Design, 55: 250–256 (2014).
- [5] Josefson, B., Nilsson, J.O. and Wilson, A., “Phase transformation in duplex steels and the relation between continuous cooling and isothermal heat treatment”, Proc. Conf. Dup. Stainless Steel, 91:67-69 (1991).
- [6] Pettersson, C. O., Fager, S. Å., & Steel, A. S. (1995). Welding practice for the Sandvik duplex stainless steels SAF 2304, SAF 2205 and SAF 2507. *AB Sandvik Steel, Sweden*.
- [7] Gündüz, S. (2008). Static strain ageing behaviour of dual phase steels. *Materials Science and Engineering: A*, 486 (1-2), 63-71.
- [8] Lee, S. H., Choi, J. Y., & Nam, W. J. Hardening behavior of a 304 stainless steel containing deformation-induced martensite during static strain aging. *Materials transactions*, (2009).
- [9] Glen, J., “Effect of alloying elements on the high temperature tensile strength of normalised low carbon steel”, Journal of the Iron and Steel Institute, 186: 21-32 (1957).
- [10] Strutt, A.J. and Larimer, J.W., “Structure property relationships of Zeron 100”, Proc. Conf. Phase Transformation, Cambridge, 178 (1987).
- [11] Graff, S., Forest, S., Strudel, J. L., Prioul, C., Pilvin, P. And Béchade, J. L., “Strain localization phenomenon associated with static and dynamic strain ageing in notched specimens: experiments and finite element simulations”, *Materials Science and Engineering A*, 387–389: 181–185 (2004).
- [12] Wilson, D.V. and Russel, B., “The contribution of precipitation to strain ageing in low carbon steels”, *Acta Metall.*, 8: 468-479 (1960).
- [13] Gündüz, S. & Kaçar, R. (2000). Static Strain Ageing In Microalloyed Steels *Teknoloji*, 3(4).
- [14] Ahmet Bülbül, “İş Makinelerinin Jantlarında Statik Yaşlanmanın Etkisinin Araştırılması” Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2014).

- [15] Şadettin Okumuş, “Düşük Karbonlu Mikroalaşımli Çeliklerde Soğuma Ve Deformasyon Yaşlanması Mekanik Özelliklere Etkisi” Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2013).
- [16] Ghosh, A., Chatterjee, A., (2008). Ironmaking & Steelmaking. London: Prentice Hall of India Book Company.
- [17] Altuntaş, O., & Güral, A. (2019). Designing spherical cementite in bainitic matrix (SCBM) microstructures in high carbon powder metal steels to improve dry sliding wear resistance. *Materials Letters*, 249, 185-188.

# The Effect of Nb Addition and Sintering Conditions on AISI-420 Martensitic Stainless Steels Produced by Powder Injection Molding: Microstructural, Mechanical and Corrosion Properties

 Lütfi YAKUT<sup>1</sup>  Semih ÖZBEY<sup>2</sup>  H.Özkan GÜLSOY<sup>2,\*</sup> 
<sup>1</sup>Marmara University, Inst. Graduate Studies Pure and Applied Sci., 34722, Istanbul, Turkey

<sup>2</sup>Marmara University, Technology Faculty, Metallurgy and Materials Eng. Dep., 34722 Istanbul, Turkey

## Graphical/Tabular Abstract

### Article Info:

Research article

Received: 03/05/2020

Revision: 19/06/2020

Accepted: 11/08/2020

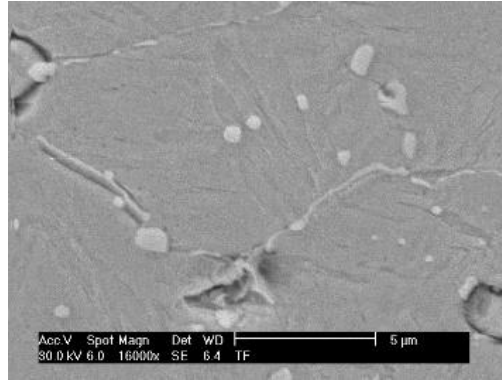
### Highlights

- Powder Metallurgy
- Sintering
- Mechanical Properties

### Keywords

 Powder Injection  
 Molding Martensitic  
 Stainless Steel  
 Sintering  
 Mechanical Properties

In this study, sintering, mechanical and corrosion properties of AISI-420 martensitic stainless steels, which were shaped by PIM method and added Nb, were investigated. The samples with and without Nb addition sintered under different conditions were compared and the results obtained were discussed.



**Figure A.** Microstructure of Nb added sample

**Purpose:** The aim of this study is to improve microstructural, mechanical and corrosion properties of AISI-420 martensitic stainless steels produced by PIM by adding Nb addition.

**Theory and Methods:** It is possible to improve the properties of martensitic stainless steels used for general applications by making different composition changes. In particular, the addition of hardness and strength enhancing elements changes all engineering properties of this type of stainless steel. Due to this approach, Nb element was added to improve the engineering properties of AISI-420 type stainless steels.

**Results:** The results have shown that Nb added samples were sintered at 1350 °C for 1 hour in H<sub>2</sub> atmosphere, 99% relative density, 1325 MPa tensile strength, 2.9% elongation and 48.6 HRC hardness values were obtained.

**Conclusion:** In this study, the effect of 1% Nb addition on the microstructural, mechanical and corrosion properties of AISI-420 martensitic stainless steels produced by PIM was investigated. With the increase of sintering temperatures, all mechanical and corrosion properties, especially density, have improved. On the other hand, samples sintered in H<sub>2</sub> atmosphere exhibited higher properties than samples sintered in Ar atmosphere. In addition, the addition of Nb has improved sintering behavior under all sintering conditions and significantly improved mechanical and corrosion properties.



## Nb İlavesi ve Sinter Şartlarının Toz Enjeksiyon Kalıplama ile Üretilmiş AISI-420 Martenzitik Paslanmaz Çelikler Üzerine Etkisi : Mikroyapısal, Mekanik ve Korozyon Özellikler

Lütfi YAKUT <sup>1</sup> Semih ÖZBEY <sup>2</sup> H.Özkan GÜLSOY <sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup>Marmara University, Inst. Graduate Studies Pure and Applied Sci., 34722, Istanbul, Turkey

<sup>2</sup>Marmara University, Technology Faculty, Metallurgy and Materials Eng. Dep., 34722 Istanbul, Turkey

### Öz

Bu araştırma makalesinde, Toz Enjeksiyon Kalıplama metodu kullanılarak üretilmiş AISI-420 martenzitik paslanmaz çeliklerin mikroyapısal, mekanik ve korozyon özellikleri üzerine Nb ilavesinin ve sinterleme şartlarının etkisi incelenmiştir. Gaz atomizasyonu ile üretilmiş önalaşım AISI-420 paslanmaz çelik tozlar polimerik bağlayıcılar ile karıştırılarak besleme stoğu oluşturulmuş ve enjeksiyon kalıplama metodu kullanılarak şekillendirme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Kalıplama işlemi sonrasında, solvent ve ısıl bağlayıcı giderme işlemleri uygulanarak kullanılan bağlayıcıların büyük bir kısmı yapıdan uzaklaştırılmıştır. Bağlayıcısı giderilmiş numuneler 1250-1350 °C sıcaklık aralığında H<sub>2</sub> ve Ar atmosferi altında sinterlenmiştir. Nihai özelliklerin eldesi için numuneler sinterleme sonrasında ısıl işlemlere tabi tutulmuştur. Isıl işlem görmüş numunelerin yoğunlukları Arşimet prensibine göre ölçülmüştür. Mikroyapısal gelişimlerin belirlenmesi için metalografik prosedürler; mekanik özelliklerin belirlenmesi için çekme testi ve sertlik ölçümleri; korozyon dirençlerinin tespiti için potansiyometrik ölçümler gerçekleştirilmiştir. Nihai numunelerin %99 kısmi yoğunluk değerlerine ulaştığı, Nb ilavesinin tüm mekanik ve korozyon özelliklerini geliştirdiği gözlemlenmiştir. Buna ilave olarak H<sub>2</sub> sinterleme atmosferinde sinterlenen numunelerin en iyi özellikleri sergilediği görülmüştür.

### Makale Bilgisi

*Araştırma makalesi*  
 Başvuru: 03/05/2020  
 Düzeltilme: 19/06/2020  
 Kabul: 11/08/2020

### Anahtar Kelimeler

*Toz Enjeksiyon Kalıplama*  
*Martenzitik Paslanmaz*  
*Çelik*  
*Sinterleme*  
*Mekanik Özellikler*

### Keywords

*Powder Injection Molding*  
*Martensitic Stainless Steel*  
*Sintering*  
*Mechanical Properties*

### The Effect of Nb Addition and Sintering Conditions on AISI-420 Martensitic Stainless Steels Produced by Powder Injection Molding: Microstructural, Mechanical and Corrosion Properties

### Abstract

In this research article, the effect of Nb addition and sintering conditions on the microstructural, mechanical and corrosion properties of AISI-420 martensitic stainless steels produced by Powder Injection Molding method was investigated. The feedstock was formed by mixing the alloyed AISI-420 stainless steel powders produced by gas atomization with polymeric binders and shaping processes were carried out using the injection molding method. After the molding process, solvent and thermal binder removal processes were applied and most of the binders used were removed from the structure. The debinded samples were sintered under H<sub>2</sub> and Ar atmosphere in the temperature range of 1250-1350 °C. Samples were subjected to heat treatment after sintering in order to obtain the final properties. Densities of heat-treated samples were measured according to Archimedes principle. Metallographic procedures for determining microstructural developments; tensile testing and hardness measurements to determine mechanical properties; potentiometric measurements were carried out to determine corrosion resistance. It was observed that the final samples reached 99% relative density values, and Nb addition improved all mechanical and corrosion properties. In addition, samples sintered in an H<sub>2</sub> sintering atmosphere were found to exhibit the best properties.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Toz enjeksiyon kalıplama (TEK) yüksek performanslı malzemelerin, karmaşık ve net şekle yakın parçalarının üretimi için kullanılan bir toz metalurjisi işlemidir. Bu teknik temel olarak plastik enjeksiyon kalıbının avantajlarını ve geleneksel toz metalurjisinin çok yönlülüğü ile birleştirilerek küçük boyutlu, dar tolerans ve düşük üretim maliyetinin sergilendiği bir üretim metodudur. TEK, geleneksel toz sıkıştırmanın şekil sınırlamasını, işleme maliyetini, izostatik presleme ve döküm işlemlerinin verimlilik sınırlarını ve konvansiyonel dökümün hata ve tolerans sınırlamalarının üstesinden gelebilecek düzeydedir [1-3]. Toz enjeksiyonla kalıplanmış bir malzemenin mekanik özellikleri ve döküm/dökme malzemenin ayırt edilemez. TEK metodu dört ardışık adımdan oluşur; toz ve bağlayıcıları karıştırılarak besleme stoğunun oluşturulması, enjeksiyonla kalıplama, bağlayıcı giderme ve sinterleme. Bazı durumlarda ve eğer gerekirse, sinterlemeden sonra farklı ikincil veya bitirme işlemlerinde kullanılabilir [3].

Paslanmaz çelikler içerisinde özellikle yüksek sertlik ve aşınma mukavemetlerinden dolayı tercih edilen martenzitik paslanmaz çelikler, üstün mekanik performansın arzu edildiği birçok uygulamada kullanılmaktadır. Korozyon dirençleri bakımından diğer paslanmaz çelikler içerisinde alt düzeylerde bulunsun da, ısıtma işlemi ile istenilen mekanik özelliklerin elde edilmesi martenzitik paslanmaz çeliklerin en önemli özelliklerindedir [4, 5]. AISI-420 paslanmaz çelikler martenzitik paslanmaz çelikler içerisinde üst düzey mekanik özellikler ve üstün korozyon dirençlerinden dolayı en popüler martenzitik paslanmaz çelik tipidir. Bu tip paslanmaz çelikler döküm, dövme, toz metalurjisi (TM) ve eklemeli imalat (Eİ) teknikleri ile kolaylıkla üretilebilmekte ve ürün performansları uygulamalara göre çeşitlendirilebilmektedir [6]. TEK metodu paslanmaz çeliklerin üretiminde çok yaygın olmasına rağmen AISI-420 [6] ve AISI-440 [7] paslanmaz çeliklerin üretiminde sınırlı düzeyde kullanılmıştır. Özellikle net ölçülerde parçaların üretiminde kullanılan TEK metodu bu tip paslanmaz çelik parçaların üretiminde de kolaylıkla kullanılabilir. AISI-420 paslanmaz çelikler içerisine yapılacak olan bazı elementel ilavelerle mekanik ve korozyon özelliklerinin geliştirilebileceği bilinmektedir [8]. Bu ilaveler içerisinde B, Nb, Ti ve Mo kullanımı ile ilgili bazı literatür bilgilerine rastlansa da TEK ile üretilen AISI-420 paslanmaz çelikler üzerine yapılan detaylı bir bilgi mevcut değildir. Özellikle Nb ilavesinin paslanmaz çeliklerin mekanik özellikleri geliştirdiği ve korozyon dirençlerini artırdığı bilinmektedir [8, 9, 10, 11]. Diğer taraftan, paslanmaz çeliklerin sinterlenmesi üzerine yapılan farklı çalışmalarda, sinterleme atmosferlerinin final ürün özelliklerinin etkisiyle ilgili bilgilere rastlanmaktadır [12] fakat sinterleme atmosferinin AISI-420 paslanmaz çeliklerin sinterleme davranışlarına ve ürün performansı üzerine etkisi bilinmemektedir. Özellikle H<sub>2</sub> gibi yüksek ısı iletim katsayısı ve redüksiyon özelliklerine sahip olan sinterleme atmosferinin, sinterleme üzerine etkisi oldukça baskındır. Bu bakımda paslanmaz çeliklerin sinterlenmesinde sıklıkla kullanılan H<sub>2</sub> atmosferinin AISI-420 paslanmaz çeliklerin sinterlenmesi üzerine etkisinin büyük olacağı düşünülmektedir.

Bu çalışmanın amacı, TEK ile üretilmiş AISI-420 martenzitik paslanmaz çeliklere yapılan Nb ilavesinin ve sinterleme atmosferlerinin mikroyapısal, mekanik ve korozyon özelliklerine etkisinin incelenmesidir. Sinterleme davranışlarını araştırmak için sinterlenmiş ve ısıtma işlemi yapılmış numuneler üzerinde metalografik incelemeler, mekanik özelliklerin tespiti için çekme ve sertlik deneyleri ve korozyon özelliklerinin belirlenmesi için potansiyometrik ölçümler gerçekleştirilmiştir. Tozların morfolojisi, kalıplanmış ve sinterlenmiş numunelerin kırık yüzeylerinin incelenmesinde taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve elementel analizleri için SEM-EDS kullanılmıştır.

## 2. MALZEME ve METOT (MATERIALS and METHOD)

DeneySEL çalışmalarda kullanılan gaz atomizasyonu ile üretilmiş AISI-420 ve Nb ilaveli AISI-420 tozlarının kimyasal özellikleri Tablo 1’de, fiziksel özellikleri ise Tablo 2’de verilmiştir. Tozların ortalama partikül boyut dağılımları Malvern Mastersizer cihazı ile belirlenmiş ve Şekil 1a-b de SEM fotoğraflarının sol üst köşesinde verilmiştir. AISI-420 ve Nb ilaveli AISI-420 tozların partikül boyut dağılımlarının temel olarak birbirine yakın ve benzer olduğu görülmektedir. Tozlara ait SEM görüntüleri Şekil 1a-b’den de görüleceği gibi küresel şekilli olduğu bilinmektedir.

Bağlayıcı sistemi olarak parafin mum, karnauba mum, polipropilen ve stearik asitten oluşan çok bileşenli bir bağlayıcı sistemi kullanılmıştır. Bağlayıcılara ait teknik özellikler Tablo 3’de verilmiştir. Solvent ve ısıtma bağlayıcı giderme işlemleri sırasında numune şekillerinin bozulmaması için farklı özelliklerde bağlayıcılar kullanılmıştır.

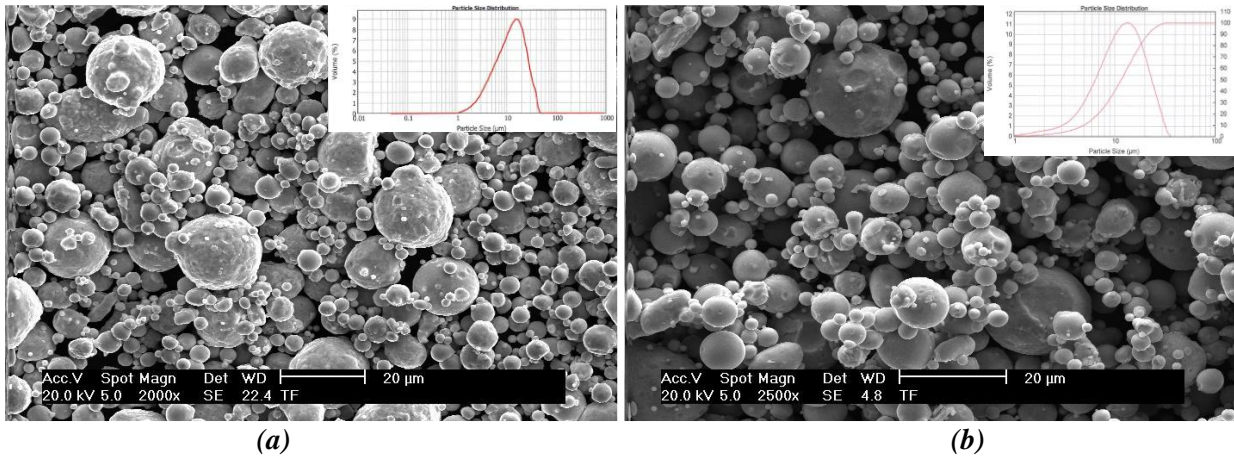
Besleme stoğunun oluşturulması için bağlayıcılar 175 °C'de eritilmiş ve daha sonra tozlar kademeli olarak ilave edilmiştir. Besleme stoğu için katı toz yükleme oranı hacimce % 62,5 olarak seçilmiştir. Nb ilaveli ve ilavesiz AISI-420 tozlarından hazırlanan besleme stoklarının akış davranışları Anton Paar-MCR51 marka rotasyonel viskozimetre ile belirlenmiştir. Artan sıcaklıklara karşılık vizkozite değerleri ve optimum kalıplama sıcaklığı tespit edilmiştir.

**Tablo 1.** AISI-420 paslanmaz çelik tozunun fiziksel özellikleri

Toz	AISI-420	AISI 420+Nb
Tedarikçi	Osprey Co.	Osprey Co.
Üretim Metodu	Gaz Atomizasyonu, N	Gaz Atomizasyonu, N
Şekil	Küresel	Küresel
Partikül boyutu, $D_{10}$ , ( $\mu\text{m}$ )	4,30	5,07
Partikül boyutu, $D_{50}$ , ( $\mu\text{m}$ )	12,55	11,78
Partikül boyutu, $D_{90}$ , ( $\mu\text{m}$ )	26,64	21,80
Vurgu yoğunluğu, $\text{g/cm}^3$	4,70	4,90

**Tablo 2.** AISI-420 paslanmaz çelik ve AISI-420+ Nb tozunun kimyasal kompozisyonu.

	Element, % ağı.											
	Fe	Nb	Mo	Cr	Ni	Mn	Si	P	C	S	O	N
AISI-420 (Sandvik- Ospray)	Bal.	--	--	12-14	--	<1,0	<1,0	<0,04	>0,15	<0,03	--	--
420+Nb (Sandvik- Ospray)	Bal.	1,0	0,56	12,0	0,65	0,9	0,9	--	0,3	--	--	--
AISI-420 MPIF Standart	Bal.	--	--	12,8	--	0,72	0,79	0,012	0,3	0,01	0,04	0,09



**Şekil 1.** AISI-420 matenzitik paslanmaz çelik tozlarına ait SEM görüntüleri ve partikül boyut dağılım eğrileri; a) AISI420, b) Nb ilaveli AISI-420

**Tablo 3.** Kullanılan bağlayıcılara ait teknik veriler

Yoğunluk $\text{g/cm}^3$	Ergime Sıcaklığı $^{\circ}\text{C}$	Molekül ağırlığı $\text{g/mol}$
-----------------------------	--	------------------------------------

<i>Parafin mum (MERC)</i>	0,90	90	350-420
<i>Carnauba mum (MERC)</i>	0,97	112	1300-1500
<i>Polypropilen (PETKIM)</i>	0,89	161	43000
<i>Stearik asit (MERC)</i>	0,85	73	285

Hazırlanan besleme stokları, laboratuvar çalışmaları için özel dizayn edilen enjeksiyon kalıplama cihazında 180°C’de 12,5 MPa basınçta ve 20 s. süre ile kalıplanmıştır (kalıp sıcaklığı : 40 °C, kalıp sıkıştırma basıncı: 5 ton). Kalıplanan besleme stokları MPIF-35 standartlarına göre şekillendirilmiştir. Kalıplanmış numuneler solvent ve ısıl bağlayıcı giderme işlemlerine tabi tutulmuşlardır. Solvent bağlayıcı giderme işlemleri 60°C’de heptan içerisinde 4 saat süreyle gerçekleştirilmiş ve sonrasında numuneler etüv içerisinde 12 saat kurutulmuştur. Isıl bağlayıcı giderme işlemleri, yüksek saflıkdaki Ar gazı altında 1,8 °C/dk ısıtma hızıyla 600 °C’a çıkartılıp 1 saat süreyle bekletilmiş ve sonrasında 4 °C/dk ısıtma hızıyla 900 °C’de 1 saat süreyle ön-sinterleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Isıl bağlayıcı giderme işlemleri sonrasında 1250, 1300 ve 1350 °C sinterleme sıcaklıklarında 1 saat süreyle sinterleme işlemleri yüksek saflıkdaki Ar ve H<sub>2</sub> gibi iki farklı sinterleme atmosferinde gerçekleştirilmiştir.

Sinterlenmiş numunelere ısıl işlem uygulaması için 1030 °C’de 30 dk solüsyona alma işlemi uygulanmış ve sonrasında ani olarak soğutularak su-verme işlemi uygulanmıştır. Su-verme işlemi sonrasında 440 °C’de temperleme ısıl işlemi uygulanmıştır. Sinterlenmiş ve ısıl işlem yapılmış çekme deneyi numunelerinin yoğunlukları Arşimet prensibine göre ölçülmüştür. Çekme deneyi numunelerinden alınan kesitler üzerinde metalografik çalışmalar yapılmış ve mikroyapısal gelişim optik mikroskop kullanılarak gözlemlenmiştir. Mikroyapısal detaylar ve elementel dağılım analizleri için SEM-EDS (FEI-Srion) kullanılmıştır. Mekanik özelliklerin tespiti için çekme deneyleri Zwick-Z250 mekanik test cihazı kullanılarak 25,4 mm / dakika sabit çekme hızlarında gerçekleştirilmiştir. Sertlik ölçümleri HRC skalasında Instron-Wolpert Dia Testor 7551 kullanılarak yapılmıştır. Çekme deneyi sonrasında kırık numune yüzeyleri SEM (FEI-Srion) ile incelenmiştir. Tüm deneyler ve ölçümler ortalama beş farklı numune üzerinde gerçekleştirilmiştir.

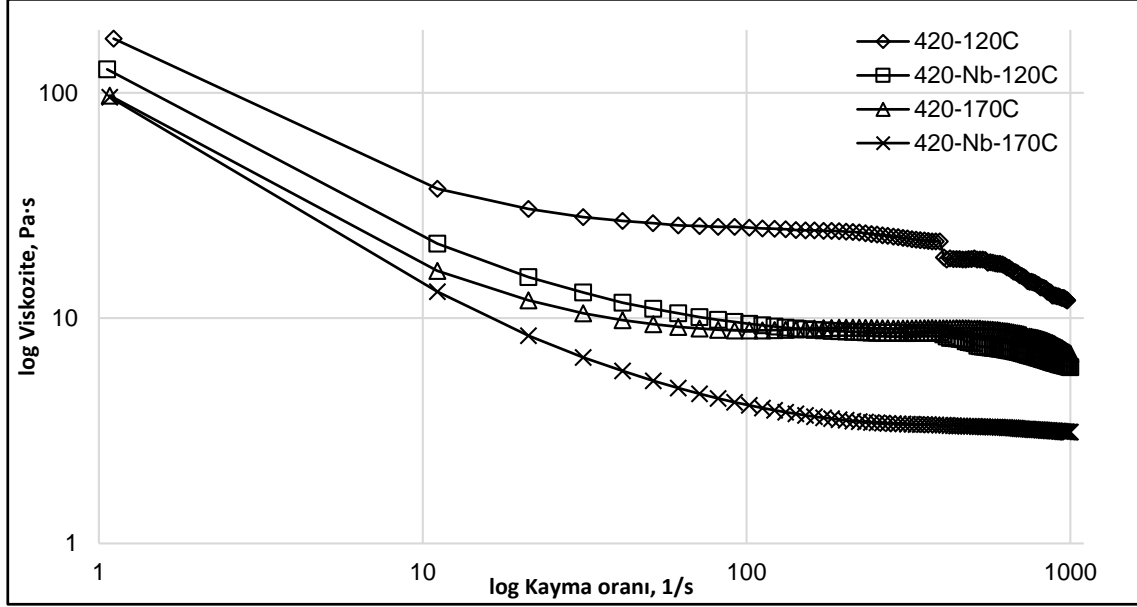
Elektrokimyasal işlemlerden önce numuneleri hassas kesme cihazında 1 cm<sup>2</sup>’nin altında yüzey alanı bırakacak şekilde kesip soğuk kalıplama için hazır hale getirilmiştir. Veri iletimi için numunenin bir yüzeyine lehim ile bakır bir tel tutturulmuş ve sonra soğuk kalıplama işlemi uygulanmıştır. Yüzey pürüzlülüğünden kaynaklanacak hataları en aza indirmek için SiC partikülleri ile 500’lük zımpara kağıdı ile zımparala işlemine tabi tutulmuştur. Hem literatürde hem de endüstriyel analizleri için yaygın olarak kullanılan %3,5 NaCl çözeltisi hazırlanmış ve korozif ortam olarak kullanılmıştır. Bu ortamın diğer bir özelliği ise temsili olarak deniz ortamına yakın bir kimyasal çözelti bileşimine sahip olmasıdır. Polarizasyon ve açık devre analizlerini gerçekleştirmek için sinterlenmiş ve ısıl işlem uygulanmış Nb ilaveli ve ilavesiz AISI-420 numune çalışma elektrotu, doymuş kalomel (SCE) referans elektrot ve grafit çubuk karşıt elektrottan meydana gelen standart üç elektrotlu bir deney hücresi kullanılmıştır. Korozyon hızını tayin etmek için oda sıcaklığında ilk olarak açık devre potansiyeli ardından Tafel analizleri yapılmıştır. Elektrolitik ortam her bir deney sürecinde yeniden hazırlanıp tekrarlanarak gerçekleştirilmiştir.

### 3. BULGULAR ve TARTIŞMA (Result and Discussion)

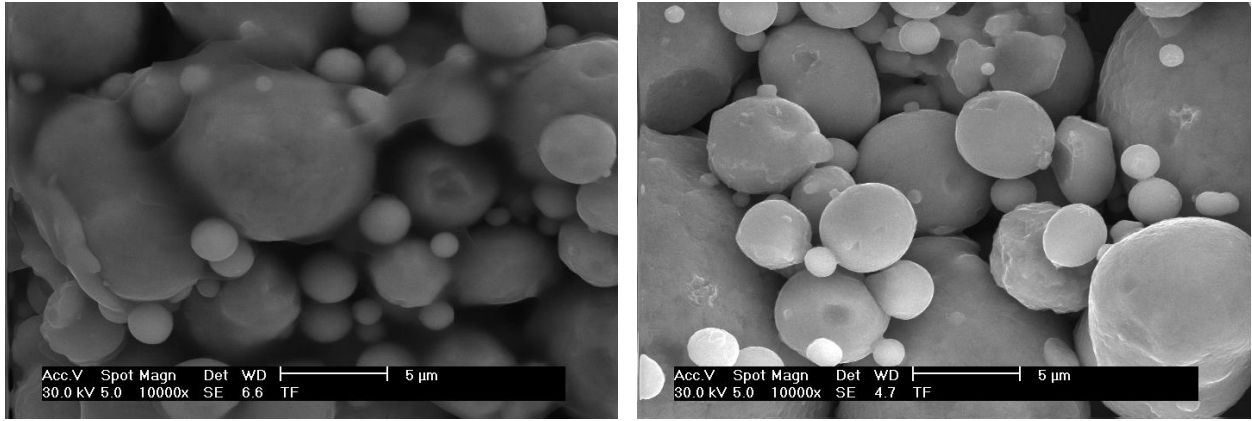
Nb ilaveli ve ilavesiz tozlardan hazırlanan besleme stokları için artan kayma oranına ve sıcaklığa bağlı olarak vizkozite değerlerinin değişimi Şekil 2’de verilmiştir. Tüm besleme stoklarında sıcaklığın artmasına bağlı olarak vizkozite değerleri düşmektedir. Bu düşüşün nedeni, sıcaklığın artması ile birlikte polimerik bağlayıcıların vizkozitelerinin düşmesidir [2, 3]. Diğer taraftan kayma oranının artması ile birlikte vizkozite değerleri tüm besleme stokları için düşmektedir. Özellikle düşük kayma oranlarında yüksek vizkozite değerleri elde edilmiş fakat kayma oranının artması ile birlikte vizkozite değerleri hızla düşmüştür. Başarılı bir kalıplama için optimum vizkozite değerlerinin kalıplama şartlarında 100 Pa.s nin altında olması istenmektedir [3, 13, 14]. Nb ilaveli ve ilavesiz besleme stoklarının vizkozite değerleri karşılaştırıldığında, Nb ilavesiz tozlardan hazırlanan besleme stoklarının daha yüksek vizkozite sergiledikleri görülmüştür. Bunun temel sebebi, bu tozların yüzey morfolojilerinin daha pürüzlü olduğu ve buna bağlı olarak kaymayı zorlaştırdığı düşünülmektedir [2, 3]. Besleme stoğunda kullanılan tozların yüzey pürüzlülüğü arttıkça toz yüzey alanlarının arttığı ve buna bağlı olarak bağlayıcılar ile yüksek kohezyon oluşturduğu bilinmektedir [1-3]. Bu şartlarda kalıplama sıcaklığı 170 °C’nin bir miktar üzerinde 180 °C’de gerçekleştirilmiştir.



Kalıplama ve ısıtıcı bağlayıcı giderme işlemi sonrasında numunelerden alınan SEM görüntüleri Şekil 3’de verilmiştir. Buradan da görüleceği gibi kalıplama sonrasında partiküller arasında bağlayıcıların mevcudiyeti ve partikülleri uygun şekilde bağladığı açıkça görülmektedir. Genel olarak numunelerde herhangi bir gözenğe, boşluğa ve laminasyona rastlanmamaktadır. Isıtıcı bağlayıcı giderme sonrasında tüm yapıdan bağlayıcıların uzaklaştığı ve sadece partiküllerin bulunduğu görülmektedir.



Şekil 2. Nb ilaveli ve ilavesiz AISI-420 tozlardan hazırlanan besleme stokları için sıcaklığa bağlı viskozite-kayma oranının değişimi



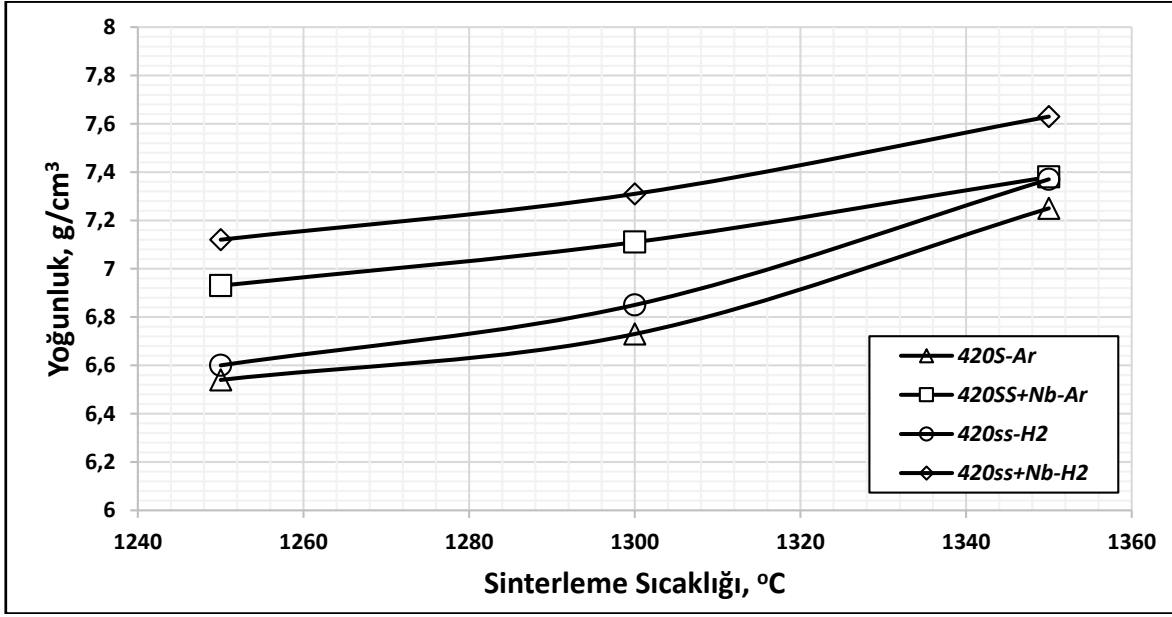
(a)

(b)

Şekil 3. (a) Kalıplanmış, (b) ısıtıcı bağlayıcı giderilmiş numunelerden alınan SEM görüntüleri

Şekil 4’de artan sinterleme sıcaklığına bağlı olarak sinterlenmiş numunelerin yoğunluklarının değişimi verilmiştir. Aynı grafik üzerinde Nb ilavesinin ve sinterleme atmosferinin sinterlenmiş numunelerin yoğunlukları üzerine etkisi görülmektedir. Sinterleme sıcaklığının artışı ile birlikte 1250 °C’de tüm numunelerde düşük yoğunluk değerleri elde edilirken, sinterleme sıcaklığının artması ile birlikte tüm numunelerde yoğunluk değerleri artış göstermiş ve 1350 °C’de bütün numunelerde maksimum yoğunluk değerleri elde edilmiştir. Sinterleme sıcaklığının yoğunluk üzerine baskın etkisinin olduğu bilinmektedir [1, 15-17]. Artan sinterleme sıcaklığı ile birlikte partiküller arası boyun oluşumu artmış ve bunun doğal bir sonucu olarak gözenek miktarı azalırken yoğunluk değerleri artmıştır. Numunelere yapılan Nb ilaveleri ve yoğunluk değerleri arasındaki ilişki değerlendirildiğinde, Nb ilaveli numunelerin tüm sinterleme sıcaklıklarında daha yüksek yoğunluk değerleri sergilediği görülmektedir. Bu yüksek yoğunlukların sebebi

olarak, Nb elementinin yüksek difüzyon katsayısının olması ve sinterleme sırasında aktivasyon sağlama özelliğinin bulunmasıdır [11, 19-22]. Diğer taraftan, Ar ve H<sub>2</sub> atmosferleri altında sinterlenen numunelerin yoğunluk değerleri karşılaştırıldığında, H<sub>2</sub> de yapılan tüm sinterlemelerde daha yüksek yoğunluk değerlerinin elde edildiği görülmektedir. Bu farklılığı temel sebebi, H<sub>2</sub> atmosferinin sinterleme sırasında partikül yüzeylerinde az da olsa bulunan oksit tabakalarının redüksiyonu sağlaması ve H<sub>2</sub> atmosferinin Ar atmosferinden daha yüksek bir ısı iletim katsayısına sahip olmasıdır [12]. Partikül yüzeylerindeki oksit filimlerinin H<sub>2</sub> atmosferindeki redüksiyonu difüzyon mekanizmasını hızlandırarak atomal taşınımı geliştirmektedir. Bunun doğal sonucu olarak sinterleme sonrasında gözenek miktarı azalmaktadır. Ayrıca H<sub>2</sub> gazının ısı iletim özelliklerinin yüksek oluşu da difüzyon mekanizmasına katkıda bulunur [2, 3].

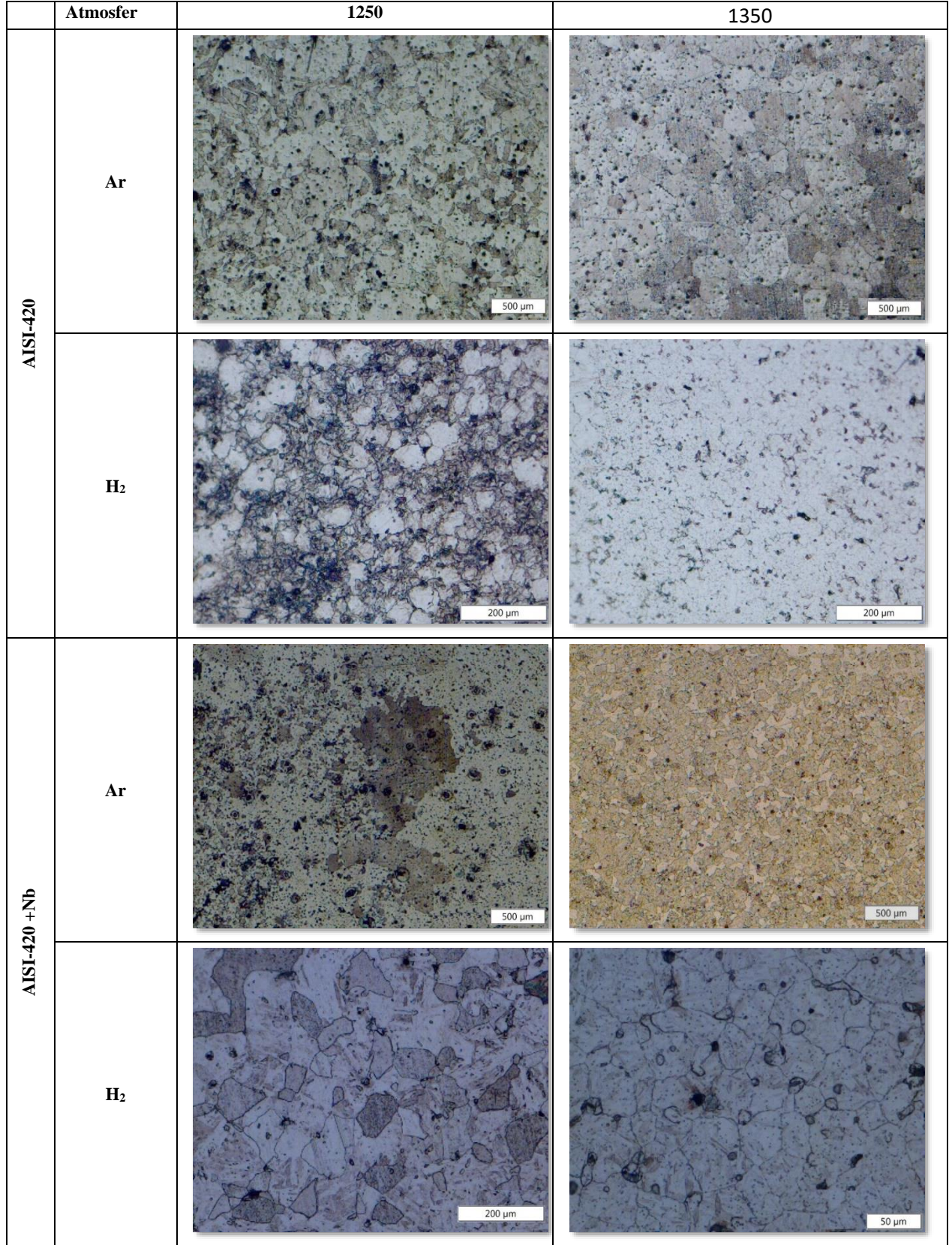


Şekil 4. Sinterleme sıcaklığı, Nb ilavesi ve sinterleme atmosferinin yoğunluk üzerine etkisi

Şekil 5’de farklı sinterleme sıcaklık ve atmosferlerinde sinterlenmiş Nb ilaveli ve ilavesiz numunelerden ısı işlem sonrası alınan mikroyapı fotoğrafları verilmiştir. 1250 °C’de sinterlenen tüm numunelerde yüksek miktarda gözenek ve yetersiz sinterlenmiş partiküller görülmektedir. Sinterleme sıcaklığının artması ile birlikte mikroyapıdaki gözeneklerin büyük oranda kapandığı, tanelerin büyüdüğü ve sinterlemenin geliştiği görülmektedir. Bununla birlikte sinterleme atmosferinin mikroyapı üzerine etkisi değerlendirildiğinde, özellikle H<sub>2</sub> atmosferinin ısı iletim katsayısının yüksekliği ve oksit redüksiyonundan [12] dolayı sinterlemenin geliştiği görülmüştür. Nb ilavesinin mikroyapı üzerine etkisi çok barizdir. Nb ilavesiz numunelerde tipik taneler ve tane sınırları gözlenirken, Nb ilaveli numunelerde özellikle NbC çökeltilerine rastlanmaktadır. NbC çökeltileri özellikle tane sınırlarında oluşmaktadır. C’un affinetesi Nb elementine Cr elementinden daha fazladır, bu yüzden yüksek sıcaklık reaksiyonu ile NbC çökelti oluşturma eğilimi daha yüksek olacaktır. Aynı zamanda oluşan NbC çökeltileri mekanik özellikleri iyileştirir. C’un Cr’a olan ilgisi Nb’un C’a olan ilgisinden daha azdır ve Nb C’a daha yüksek ilgi gösterir [5, 9, 19, 23]. Bunun sonucunda ise NbC çökeltileri daha kolay oluşurlar ve yüksek sertlik değerlerine sahiptirler. Mikroyapıdaki NbC oluşumu ise başta sertlik olmak üzere tüm mekanik özellikleri geliştirir. Bununla birlikte artan sinterleme sıcaklığına bağlı olarak yoğunluk değerlerinin artması ve gözenek miktarının azalması mekanik özelliklerin gelişiminde önemli bir mekanizma olmuştur. Isıl işlem etkisi ile tane içlerinde oluşan martenzit plakalarının mevcudiyetinde önemli ölçüde mekanik özelliklerin gelişmesine yol açmıştır [19, 23].

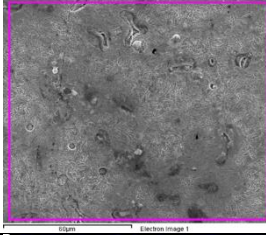


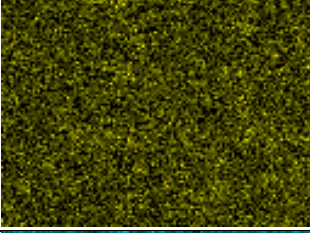
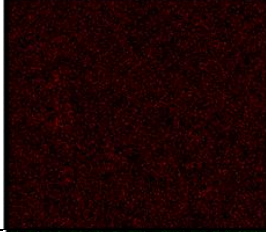
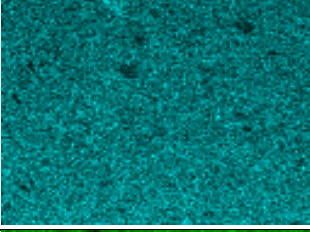
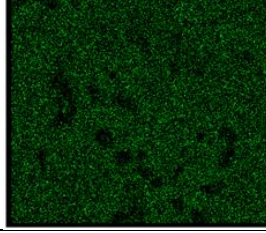
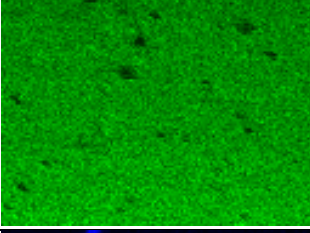
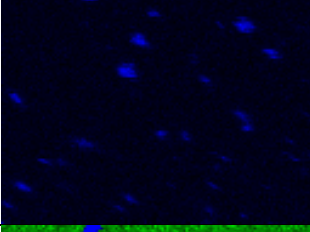
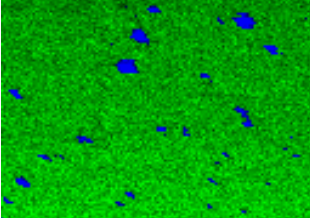
Şekil 6’da 1350 °C’de ve H<sub>2</sub> atmosferinde sinterlenen Nb ilaveli ve ilavesiz numunelerden alınan elementel dağılımları gösteren EDS elementel haritalar verilmiştir. Buradan da görüleceği gibi Nb ilavesiz numunelerde tipik bir elementel dağılım gözlemlenirken, Nb ilaveli numunelerde tane sınırlarında çökelmiş NbC çökeltilerine rastlanmaktadır. Nb ve NbC haritaları incelendiğinde NbC çökeltilerinin yapı içerisinde homojen olarak dağıldığı görülmektedir.

		Sinterleme Sıcaklığı, °C
--	--	--------------------------



**Şekil 5.** Farklı sıcaklık ve atmosferlerde sinterlenen Nb ilaveli ve ilavesiz AISI-420 paslanmaz çeliklerin mikroyapıları

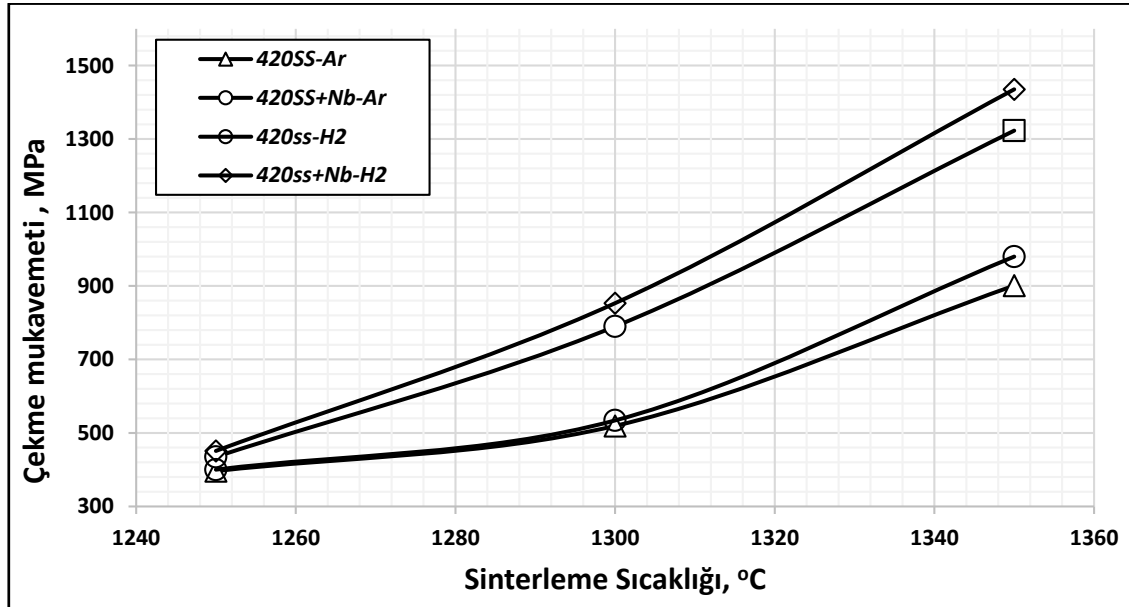
	<i>Numune</i>
--	---------------

Elementel Harita	AISI-420	AISI-420+Nb
		
<b>C</b>		
<b>Cr</b>		
<b>Fe</b>		
<b>Nb</b>	<i>Yok</i>	
<b>NbC</b>	<i>Yok</i>	

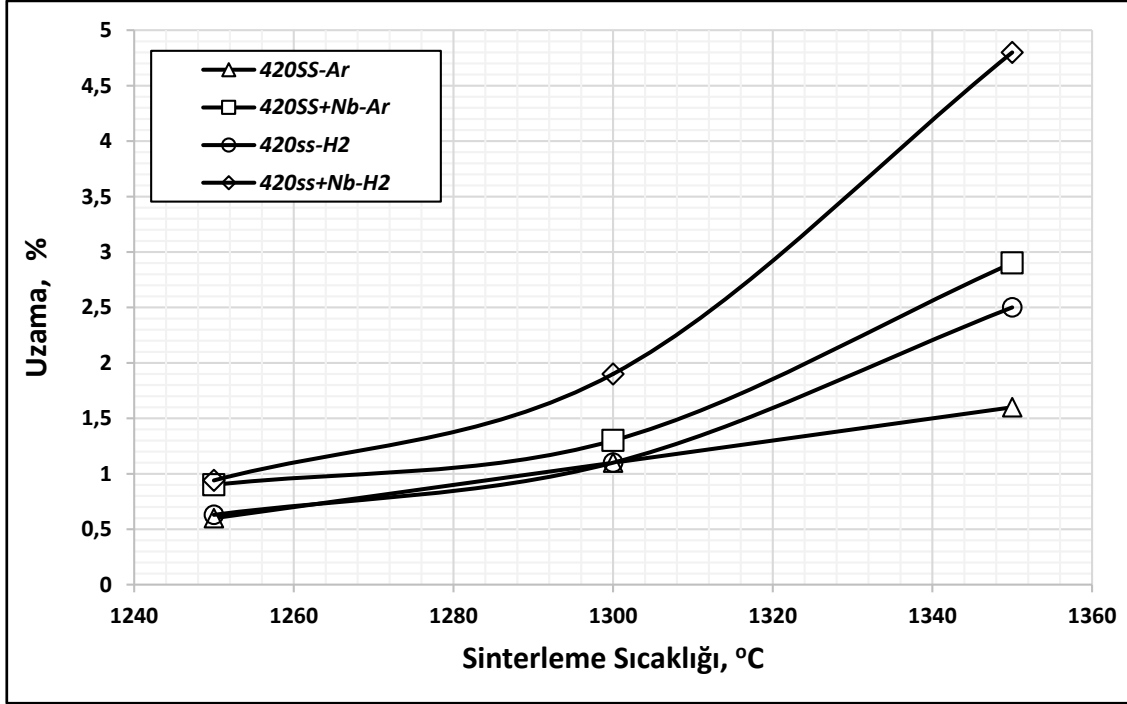
**Şekil 6.** 1350°C'de 1 saat H<sub>2</sub> atmosferinde sinterlenmiş Nb ilaveli ve ilavesiz AISI-420 numunelerine ait elementel EDS elementel haritalar

Şekil 7a-b'de artan sinterleme sıcaklığına bağlı olarak sinterlenmiş numunelerin çekme mukavemeti ve % uzama değerlerinin değişimi verilmiştir. Ayrıca grafik üzerinde Nb ilavesinin ve sinterleme atmosferinin çekme mukavemeti ve % uzama üzerine etkisi görülmektedir. Sinterleme sıcaklığının artışı ile birlikte düşük sinterleme sıcaklıklarında çekme mukavemeti değerleri 214 MPa değerlerinde iken artan sinterleme sıcaklığına bağlı olarak 1350 °C sinterleme sıcaklıklarında sinterlenen numunelerde çekme mukavemeti değerleri yaklaşık olarak 1256 MPa değerlerine ulaşmıştır. Sinterleme sıcaklığının artışıyla birlikte yoğunluk değerleri artmış ve bunun sonucu olarak çekme mukavemeti ve % uzama değerleri artış göstermiştir. Ayrıca sinterleme atmosferinin artışa katıda bulunduğu ve H<sub>2</sub> atmosferinde sinterlenen tüm

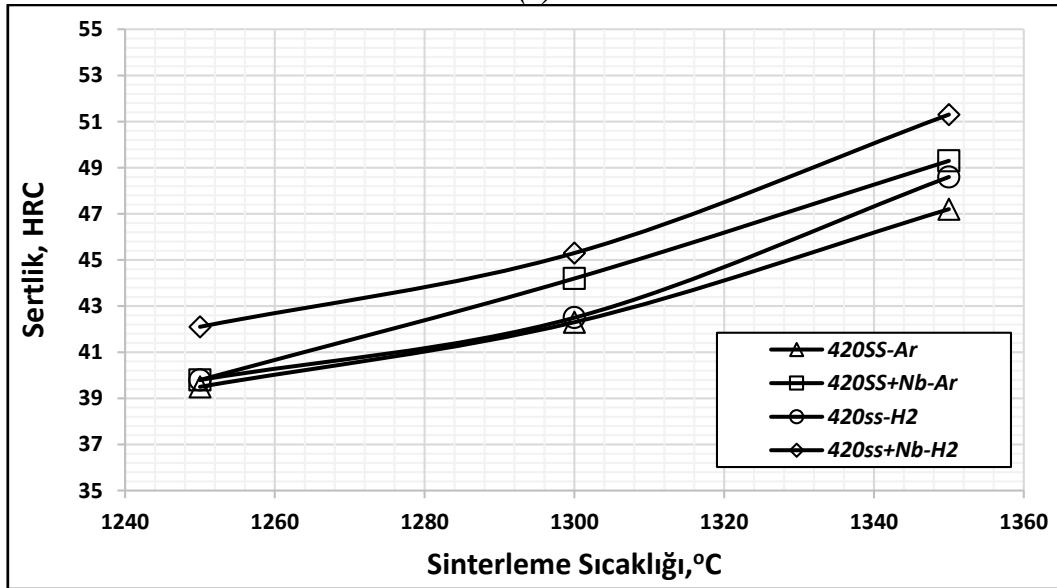
numunelerin daha yüksek çekme mukavemeti ve % uzama değerleri sergilediği görülmüştür. Nb ilavelerinin mekanik özellikler üzerine etkisi değerlendirildiğinde, Nb ilaveli numunelerin ilavesiz numunelere göre daha yüksek çekme mukavemeti ve % uzama değerleri sergilediği görülmüştür. Özellikle Nb ilavelerinin sinterleme esnasında NbC tipi karbürler oluşturduğu ve bu karbürlerin mekanik özellikleri geliştirdiği bilinmektedir [23-25]. NbC tipi karbürlerin yapıda oluşması ile birlikte özellikle numunelerin sertlik değerleri önemli ölçüde artış göstermiştir. NbC tipi karbürlerin yüksek sertliğe sahip olduğu bilinmektedir [23]. Sinterleme sıcaklığının ve atmosfer etkisinin sertlik artışı üzerine etkisi olduğu diğer mekanik özelliklerde olduğu gibi düşünülmektedir. 1350 °C sinterleme sıcaklığında ve farklı atmosferlerde sinterlenmiş numunelerin mekanik özellikleri toplu halde Tablo 4’de verilmiştir. Tablo’dan da görüleceği gibi Nb ilavesiz numuneler Ar atmosferinde sinterlendiğinde 901 MPa çekme mukavemeti, % 1,6 uzama ve 47,2 HRC sertlik değeri elde edilirken, aynı numuneler H<sub>2</sub> atmosferinde sinterlendiğinde bu değerler 1325 MPa çekme mukavemeti, % 2,9 uzama ve 48,6 HRC sertlik değerlerine ulaşmıştır. H<sub>2</sub> atmosferinin sinterleme davranışlarını geliştirdiği net şekilde görülmektedir. Nb ilavesinin etkisi incelendiğine, Nb ilaveli numuneler tüm sinterleme atmosferlerinde en yüksek mekanik özellikleri sergilemişlerdir. Özellikle, H<sub>2</sub> atmosferinde sinterlenen numunelerde 1435 MPa çekme mukavemeti, % 4,8 uzama ve 51,3 HRC sertlik değerleri elde edilmiştir.



(a)



(b)



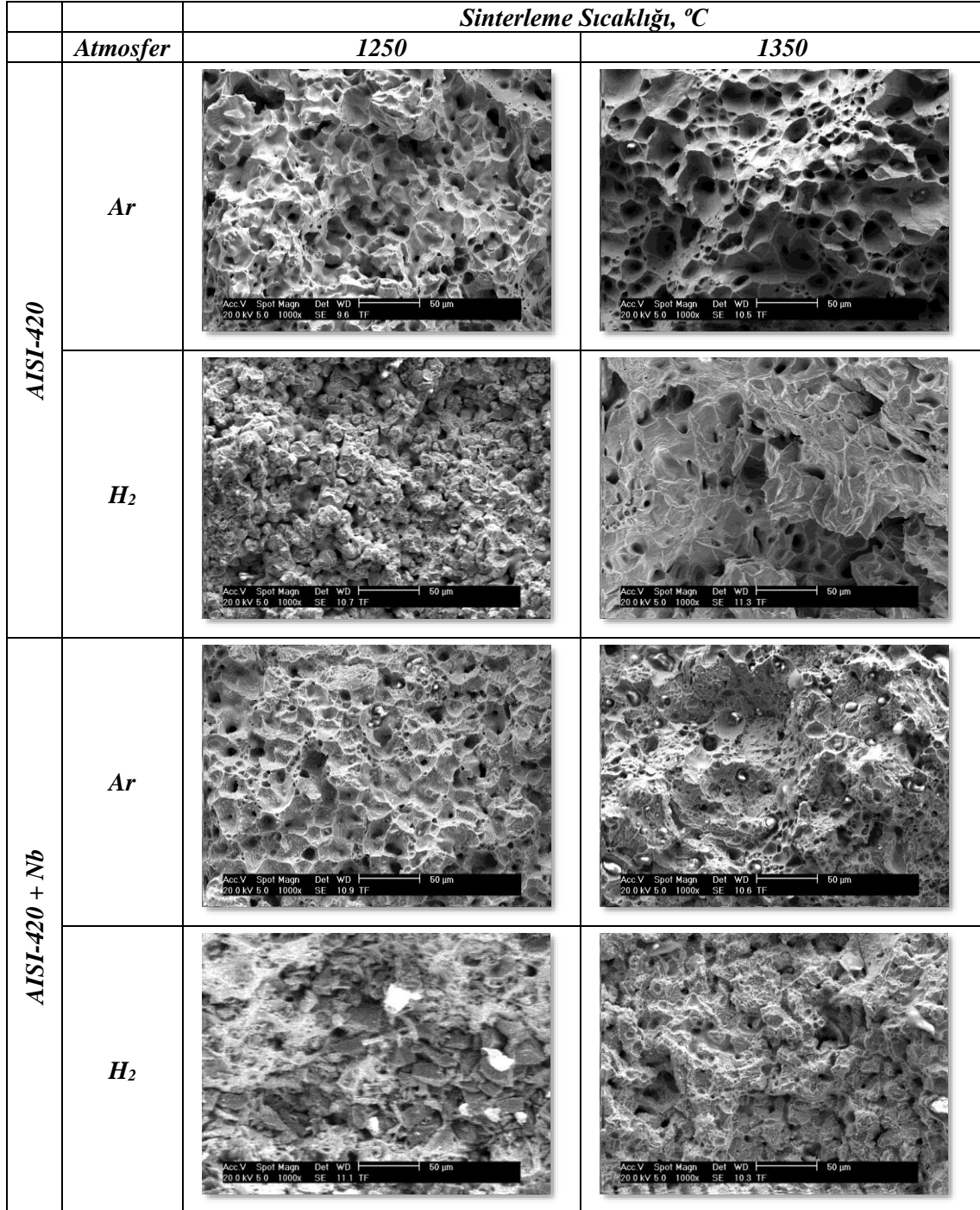
(c)

**Şekil 7.** Farklı sıcaklık ve atmosferlerde sinterlenen Nb ilaveli ve ilavesiz AISI-420 paslanmaz çeliklerin mekanik özelliklerinin değişimi

**Tablo 4.** Farklı sıcaklık ve atmosferlerde sinterlenen Nb ilaveli ve ilavesiz AISI-420 paslanmaz çeliklerin mekanik özellikleri

Atmosfer	Numune	Yoğ. g/cm <sup>3</sup>	Kısmi Yoğ. %	Çekme mukavemeti MPa	Uzama %	Sertlik HRC
Ar	AISI-420	7,25	93,91	901	1,6	47,2
	AISI-420+Nb	7,37	95,46	980	2,5	48,6
H <sub>2</sub>	AISI-420	7,37	95,46	1323	2,9	49,3
	AISI-420+Nb	7,63	98,83	1435	4,8	51,3

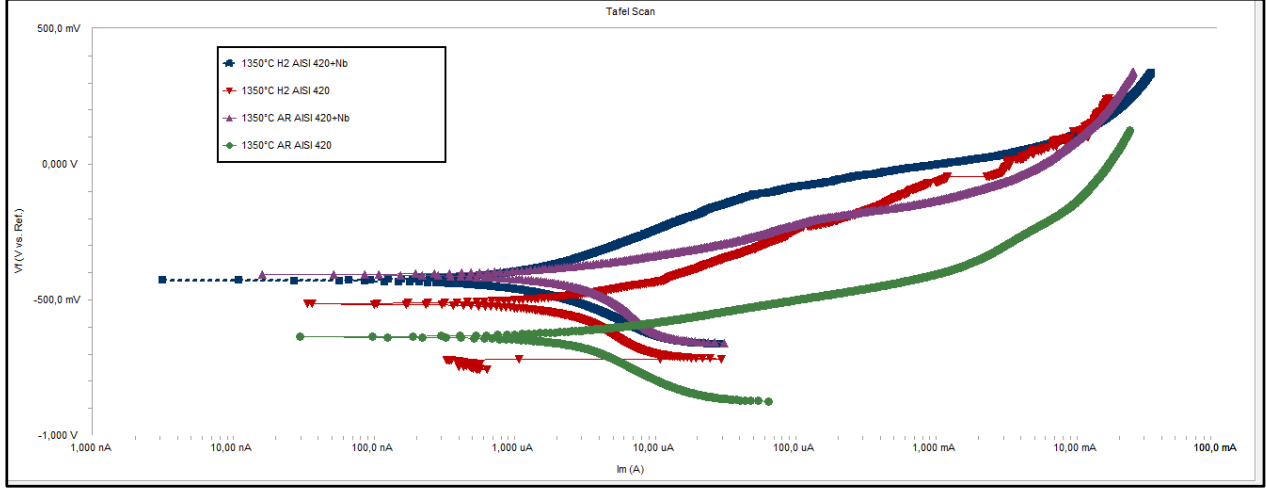
Şekil 8’de farklı sıcaklıklarda ve atmosferlerde sinterlenmiş Nb ilaveli ve ilavesiz AISI-420 paslanmaz çelik numunelerde alınmış kırık yüzey SEM görüntüleri verilmiştir. Düşük sinterleme sıcaklıklarından dolayı kırık yüzeylerinde çukurcuk formasyonu ve gözenekler görülürken, artan sinterleme sıcaklığına bağlı olarak çukurcukların ve gözeneklerin azaldığı görülmektedir. Ayrıca Nb ilaveli ve ilavesiz numunelerin kırık yüzeyleri karşılaştırıldığında, Nb ilaveli numunelerin kırık yüzeylerinde NbC çökeltilerinin net bir şekilde ortaya çıktığı görülmektedir [26].



**Şekil 8.** Farklı sıcaklık ve atmosferlerde sinterlenen Nb ilaveli ve ilavesiz AISI-420 paslanmaz çeliklerin kırık yüzeyi SEM görüntüleri

Şekil 9’da 1350 °C de farklı atmosferlerde sinterlenen Nb ilaveli ve ilavesiz numunelere ait potansiyometrik ölçüm sonuçlarına göre hazırlanmış Tafel eğrileri verilmiştir. Genel olarak Nb ilavesi ile beraber Tafel eğrileri anodik yöne doğru kaydırıldığı ve korozyon potansiyel değerlerinde artışa neden olduğu

gözlemlenmiştir. Numunelerin tümünde hemen hemen katodik polarizasyon birbirlerine izleyen bir çizgiye sahipken anodik polarizasyon kısmında çözelti ve metal ilişkisi ile beraber meydana gelmiş reaksiyonlar neticesinde farklılaşmalar meydana gelmiştir. Özellikle düşük yoğunluk ve birbiri ile temas halinde açık gözenekler çözelti yüzey alanının artışına sebebiyet verip korozyon hızını artırdığı yapılan çalışmalarda vurgulanmıştır [27-29].



**Şekil 9.** Farklı sıcaklık ve atmosferlerde sinterlenen Nb ilaveli ve ilavesiz AISI-420 paslanmaz çeliklerin Tafel eğrileri

Tablo 5’de 1350 °C de farklı sinterleme atmosferlerinde sinterlenmiş Nb ilaveli ve Nb ilavesiz numunelere ait Tafel eğrileri üzerinden elde edilen  $E_{corr}$ ,  $I_{corr}$ ,  $\beta_A$  ve  $\beta_C$  değerleri gösterilmiştir. Nb ilaveli H<sub>2</sub> atmosferik ortamında sinterlenmiş numunede 1,460  $\mu A$  değeri ile en düşük korozyon akımına sahiptir. Yine aynı ortamda sinterlenmiş Nb ilavesiz numune ise 4,480  $\mu A$  değeri ile en yüksek korozyon akımına sahiptir. Sonra sırasıyla 3,030  $\mu A$  ve 2,500  $\mu A$  korozyon akım değerlerine sahip Argon ortamlarında sinterlenmiş Nb ilavesiz ve Nb ilaveli numuneler izlemektedir. Aynı ortamlarda Nb ilaveli numunelerin korozyon akım değerleri daha düşük çıktığı görülmektedir. Paslanmaz çeliklerin en büyük özelliği yüzeyinde çift katmanlı bir tabakanın varlığıdır [30]. Bu katmandaki Cr/Fe oranları çözeltideki pH oranına bağlı olup oksit tabaka formlarını değiştirmektedir [31]. Nb ilavesi bu oranları stabilize ettiği gibi Cl<sup>-</sup> iyonu ortamlarında meydana gelen lokalize korozyonu ve çukurcuk korozyonu engellediği yapılan çalışmada vurgulanmıştır [29-31].  $E_{corr}$  ve  $i_{corr}$  değerlerinin farklı olmasının bir diğer nedeni ise gözenek miktarı ve bu gözeneklerin birbirine açık şekilde bağlı olmasıdır. Hem yüksek gözeneklilik (dolayısıyla düşük yoğunluk) hem gözeneklerin açık oluşu korozyon direncini düşürüp korozyon hızını artırmaktadır [28-31]. Tablo 4’te elde edilen yoğunluk verileri ile korozyon akım değerleri örtüşmektedir. Yüksek yoğunluğa sahip H<sub>2</sub> ortamında sinterlenmiş Nb ilaveli numune en yüksek korozyon direncine, en düşük korozyon hızına sahip olduğu tespit edilmiştir.

**Tablo 5.** 1350 °C de ve farklı sinterleme atmosferlerinde sinterlenmiş Nb ilaveli ve Nb ilavesiz numunelere ait potansiyometrik veriler

		Ar Atmosfer	H <sub>2</sub> Atmosfer
AISI 420	$\beta_A$ , V/decade	85,00 $e^{-3}$	182,4 $e^{-3}$
	$\beta_C$ , V/decade	327,7 $e^{-3}$	873,0 $e^{-3}$
	$I_{corr}$ , $\mu A$	3,030	4,480
	$E_{corr}$ , mV	-636,0	-514,0
AISI 420+Nb	$\beta_A$ , V/decade	109,4 $e^{-3}$	219,6 $e^{-3}$
	$\beta_C$ , V/decade	316,8 $e^{-3}$	228,3 $e^{-3}$
	$I_{corr}$ , $\mu A$	2,500	1,460
	$E_{corr}$ , mV	-407,0	-428,0



#### 4. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada, ağırlıkça % 1 Nb ilavesi yapılmış ve farklı sinterleme sıcaklık ve atmosferlerde sinterlenen TEK ile şekillendirilmiş AISI-420 martenzitik paslanmaz çeliklerin mikroyapısal, mekanik ve korozyon özellikleri incelenmiştir. Sinterleme sıcaklıklarının artışı ile birlikte başta yoğunluk olmak üzere tüm mekanik ve korozyon özellikleri gelişmiştir. Diğer taraftan H<sub>2</sub> atmosferinde sinterlenen numuneler Ar atmosferinde sinterlenen numunelerde daha yüksek özellikler sergilemişlerdir. Ayrıca Nb ilavesi tüm sinterleme şartlarında sinterleme davranışlarını geliştirmiş ve özellikle mekanik ve korozyon özelliklerini önemli ölçüde geliştirmiştir. Nb ilaveli numuneler 1350 °C de 1 saat H<sub>2</sub> atmosferinde sinterlendiklerinde ve %99 kısmi yoğunluk, 1325 MPa çekme mukavemeti, % 2,9 uzama ve 48,6 HRC sertlik değerleri elde edilmiştir.

#### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Deneysel çalışmaların gerçekleştirilmesi için vermiş oldukları desteklerden dolayı Marmara Üniversitesi, Bilimsel Araştırmalar Birimi'ne teşekkür ederiz. (Proje No: Bapko- FEN-C-YLP-121218-0618)

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] German RM., Bose A., (1997). Injection molding of metals and ceramics, New Jersey, USA, MPIF, 7-25
- [2] German RM., (1990). Powder injection molding, New Jersey, USA, MPIF, 7-10
- [3] Enneti RK., Onbattuvelli VP., Gulsoy O., Kate KH., Atre SV., (2020). Handbook of metal injection molding, Powder-binder formulation and compound manufacture in metal injection molding (MIM), London, England: Woodhead Publishing Limited, 57-88
- [4] Davis JR., (1994), Stainless Steels, ASM international, Ohio, 90-125
- [5] El-Tamimi AM., El-Hossainy TM., Investigating the machinability of AISI 420 stainless steel using factorial design, Mater. Manuf. Process. 23, 419–426, (2008)
- [6] Coleman AJ., Murray K., Kearns M., Tingskog TA., Sanford B., Gonzalez E., Properties of MIM AISI 420 via pre-alloyed and master alloy routes, International Conference on Powder Metallurgy and Particulate Materials, 412–419, (2013)
- [7] <https://www.materials.sandvik/en/products/metal-powder/metal-injectionmoulding>, mim/technical-papers.
- [8] Nath SD., Clinning E., Gupta G., Poirier VW., L'Espérance G., Gulsoy O., Kearns M., Atre SV., Effects of Nb and Mo on the microstructure and properties of 420 stainless steel processed by laser-powder bed fusion, Additive Manufacturing, 28, 682–691, (2019)
- [9] Taylor K., Solubility products for titanium-, vanadium-, and niobium-carbide in ferrite, Scr. Metall. Mater. 32, 7–12, (1995)
- [10] Moroishi T., Fujikawa H., Makiura H., The effect of carbon, zirconium, niobium, and titanium on the oxidation resistance of chromium stainless steel, J.Electrochem. Soc. 126, 2173–2182, (1979)
- [11] Yan H., Bi H., Li X., Xu Z., Precipitation and mechanical properties of Nb-modified ferritic stainless steel during isothermal aging, Mater. Charact. 60, 204–209, (2009)
- [12] Koseski RP., Suri P., Earhardt NB., German RM., Kwon YS., Microstructural evolution of injection molded gas- and water-atomized 316L stainless steel powder during sintering, Materials Science and Engineering A 390, 171–177, (2005)
- [13] Karatas C., Sozen A., Arcaklioglu E., Erguney S., Investigation of Mouldability for Feedstocks Used Powder Injection Moulding., Materials Design, 29, 1713-1724, (2008)
- [14] Karataş Ç., Sarıtaş S., 316L Paslanmaz Çelik Tozları ve Polipropilen Esaslı Bağlayıcı Karışımlarının Reolojik Özellikleri. Turkish J. of Engineering Environmental Science, 22, 353-363, (1998)
- [15] Li D., Hou H., Liang L., Lee K., Powder injection molding 440C stainless steel, Int J Adv Manuf Technol, 49, 105–110 (2010)
- [16] Fujita N., Ohmura K., Yamamoto A., Changes of microstructures and high temperature properties during high temperature service of Niobium added ferritic stainless steels, Materials Sci. and Eng. A, 351, 272-281, (2003)

- [17] Hua M., Garcia C., DeArdo A., Precipitation behavior in ultra-low-carbon steels containing titanium and niobium, *Metall. Mater. Trans. A* 28, 1769–1780, (1997)
- [18] Shan Y., Luo X., Hu X., Liu S., Mechanisms of solidification structure improvement of ultra-pure 17 wt% Cr ferritic stainless steel by Ti, Nb addition, *J. Mater. Sci. Technol.* 27, 352–358, (2011).
- [19] Taylor KA., Solubility products for titanium-, vanadium-, and niobium-carbide in ferrite, *Scripta Metall.* 32, 7-12, (1995)
- [20] Rodrigues C., Lorenzo P., Sokolowski A., Barbosa C, Rollo J., Titanium and molybdenum content in supermartensitic stainless steel, *Mater. Sci. and Eng. A.*, 460, 149-152, (2007)
- [21] Jeglitsch F., Niobium in tool steels and cemented carbides, *International Symposium on Niobium*, 1001–1039, (2001)
- [22] DeArdo AJ., Niobium in modern steels, *Int. Mater. Rev.* 48, 371–402, (2003)
- [23] Brnic J., Turkalj G., Canadija M., Lanc D., Krscanski S., Martensitic stainless steel AISI 420-mechanical properties, creep and fracture toughness, *Mech. Time-Depend. Mater.* 15, 341–352, (2011)
- [24] Kimura M., Miyata Y., Toyooka T., Kitahaba Y., Effect of retained austenite on corrosion performance for modified 13% Cr steel pipe, *Corrosion* 57, 433–439, (2001)
- [25] Bautista A., Velasco F., Abenojar J., Anton N., 178th Meeting of the Electrochemical Society, Abstracts vol. 2000-2, Ed. Electrochemical Society, Phoenix, USA, 387, (2000)
- [26] Hamdy AS., El-Shenawy E., El-Bitar T., Electrochemical impedance spectroscopy study of the corrosion behavior of some niobium bearing stainless steels in 3.5% NaCl, *Int. J. Electrochem. Sci.* 1, 171–180, (2006)
- [27] Lu SY., Yao KF., Chen YB., Wang MH., Shao Y., Ge XY., Effects of austenitizing temperature on the microstructure and electrochemical behavior of a martensitic stainless steel, *J. Appl. Electrochem.* 45, 375–383, (2015)
- [28] Carnezim MJ., Simoes AM., Montemor MF., Belo C., Capacitance behaviour of passive films on ferritic and austenitic stainless steel. *Corros. Sci.* 47, 581–591, (2005)
- [29] Haupt S., Strehblow HH., A combined surface analytical and electrochemical study of the formation of passive layers on Fe/Cr alloys in 05 M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. *Corros. Sci.* 37, 43–54, (1995)
- [30] Fu J., Wang J., Li F., Cui K., Du X., Wu, Y., Effect of Nb addition on the microstructure and corrosion resistance of ferritic stainless steel. *Applied Physics A*, 126(3), 1-12, (2020)
- [31] Bautista, A., Velasco, F., Guzmán, S., Fuente, D. D. L., Cayuela, F., Morcillo, M., Corrosion behavior of powder metallurgical stainless steels in urban and marine environments, *Revista De Metalurgia*, 42(3), 175-184, (2006)

## Electromembrane Extraction Of Cr<sup>+6</sup> Metal Cation With Supported Liquid Membranes

 Gamze ÇALIK<sup>1,\*</sup> Aylin AYTAÇ<sup>2</sup> Hamza Korkmaz ALPOĞUZ<sup>1</sup>
<sup>1</sup>Pamukkale University Faculty Of Science And Literature of Chemistry, 20160, Pamukkale/DENİZLİ

<sup>2</sup>Gazi University Faculty of Science Department of Chemistry, 06500, Yenimahalle/ANKARA

### Graphical/Tabular Abstract

In this study, chromium (VI) transport was carried out using electro membrane extraction. Celgard 2500 was used as the membrane model and Aliquat 336 was preferred as the carrier fluid. The optimum value was determined as a result of constant current and various applied voltage. These values were also applied to the Celgard 2400 model membrane and the results were compared.

### Article Info:

Research article

Received: 07/05/2020

Revision: 06/07/2020

Accepted: 11/08/2020

### Highlights

- Electromembrane.
- Extraction.
- Chromium (VI) Transport

### Keywords

 Celgard 2500  
 Supported liquid  
 membrane  
 Aliquat 336  
 Electro membrane


Figure A. Membrane Module

**Purpose:** In our study, the extraction process was applied by applying six different potential values to the diffusion cell with a certain volume where a supported liquid membrane was placed.

**Theory and Methods:** Thanks to the electroanalytical approach called EME, chromium transport was provided by using the voltage power and the effect of change of membrane type was examined under constant current and constant voltage by determining the optimum conditions, and the concentration values of Cr (VI) metal from samples taken at certain time intervals for each parameter were determined by using UV-spectrophotometer. As a result of the experiments, the kinetic data of the rate constant (k), flow rate (J), permeability coefficient (P) and recovery factor (% RF) were calculated.

**Results:** As a result, it was determined that SLM-EME process successfully transported the Cr (VI) metal cation in a short extraction time.

**Conclusion:** As a result, It is a very interesting work for water treatment and recovery systems that will be developed commercially, with an efficiency of over 50 with Celgard 2500 model membrane by consuming energy in a short time such as 100 minutes and at low voltages by saving time and energy in our EME-SLM processes. Has been made.



## Destekli Sıvı Membranlar İle Cr<sup>+6</sup> Metal Katyonunun Elektromembran Ekstraksiyonu

Gamze ÇALIK<sup>1,\*</sup> Aylin AYTAÇ<sup>2</sup> Hamza Korkmaz ALPOĞUZ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Pamukkale Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi, Kimya Bölümü, 20160, Pamukkale/DENİZLİ

<sup>2</sup>Gazi Üniversitesi, Fen Fakültesi, Kimya Bölümü, 06500, Yenimahalle/ANKARA

### Öz

Hızla gelişen sanayileşme sonucunda ortaya çıkan çevre kirliliği ve özellikle ağır metal kirliliği son yıllarda hem Türkiye'nin hem de dünyanın ortak sorunu haline gelmeye başlamıştır. Bu problemi gidermek için türlü çözüm arayışına giren bilim insanları çeşitli membran prosesleri geliştirerek kirlilikleri bertaraf etme anlamında birçok çalışma yapmışlardır. Bu çalışmamızda destekli sıvı membran tekniği (SLM) kullanılarak elektromembran ekstraksiyonu (EME) olarak adlandırılan elektrodialitik yaklaşım sayesinde voltaj gücünden faydalanılmış ve iyonların ekstraksiyonu sağlanmıştır. Celgard 2500 ticari membrana faz transfer katalizörü olarak Aliquat 336 emdirilerek hazırlanan SLM (destekli sıvı membran) ile donör faz olan K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> (2x10<sup>-4</sup> M ve 0,1 M HCl'de hazırlanmış) çözeltisinden, akseptör faz olan 0,01 M NaOH çözeltisine Cr (VI) taşınımı incelendi. Sırasıyla 10V - 20V - 30V - 40V - 50V ve 60V ve 0,3 amper akım altında yapılan 100'er dakikalık çalışmalarda krom(VI) transportu için optimum değer 50 volt 0,3 amper olarak belirlenmiş ve ayrıca aynı işlem 50 volt 0,3 amper de Celgard 2400 ticari membrana uygulanmış ve yapılan deneysel veriler karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak Celgard 2500 destekli membranın verimi %54,73 olarak hesaplanırken Celgard 2400 membranın verimi ise %34,29 bulunmuştur.

### Makale Bilgisi

Araştırma makalesi  
Başvuru: 07/05/2020  
Düzeltilme: 06/07/2020  
Kabul: 11/08/2020

### Anahtar Kelimeler

Celgard 2500  
Destekli sıvı membran  
Aliquat 336  
Elektro membran

### Keywords

Celgard 2500  
Supported liquid  
membrane  
Aliquat 336  
Electro membrane

### Electromembrane Extraction Of Cr<sup>+6</sup> Metal Cation With Supported Liquid Membranes

### Abstract

In recent years, the rapidly growing environmental pollution resulting from industrialization and heavy metal derivatives, both in Turkey has started to become the world's common problems. Scientists, who searched for various solutions to solve this problem, have made many studies in terms of removing contamination by developing various membrane processes. In this study, voltage power was utilized and the extraction of ions was ensured thanks to the electro-dialytic approach called electromembrane extraction (EME) using a supported liquid membrane (SLM). Celgard 2500 was absorbed into the commercial membrane, Aliquat 336, the quaternary ammonium salt as phase transfer catalyst, and consists of the donor phase K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> (containing 2x10<sup>-4</sup> M and 0.1 M HCl) with prepared SLM (containing 2x10<sup>-4</sup> M and 0.1 M HCl). Chromium (VI) transport to 0,01 M NaOH solution was examined.

The optimum value for chromium (VI) transport is determined as 50 volts 0.3 amperes for 100 minutes of work under 10V - 20V - 30V - 40V - 50V and 60V and 0.3 amperes, respectively. In addition, the same process was applied to Celgard 2400 commercial membrane at 50 volts 0.3 amperes and the experimental data were compared. As a result, the efficiency of Celgard 2500 supported membrane was calculated as 54,73% and the efficiency of Celgard 2400 membrane was found as 34,29%.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Ağır metal kirliliği dünya üzerinde 95 milyondan fazla insanın etkilendiği endişe verici bir problemdir. 2017 yılında yapılan araştırmalarda ilk 6 toksik madde olarak kurşun, radyonüklid, cıva, Cr (VI), kadmiyum ve pestisitler sayılabilir [1]. Artan nüfusla birlikte, eser miktarda olsalar dahi zarar verebilen bu metallerin salınımı; demir çelik sanayi, termik santraller, maden yatakları, çöpler, cam endüstrisi ve daha birçok sanayi

alanında meydana gelmektedir [2], [3]. Ağır metallerin kimyasal formda karışık halde bulunması sebebiyle uzaklaştırılması da bir hayli zordur [4]. Toksik ağır metal içeren endüstriyel atıklar genellikle suda çözünür ve toprağa kolayca karışarak doğal hayatın akışını bozar [5]. Ağır metallere olan Cr(III) ve Cr(VI) iyonlarına maruz kalındığında toksik etki gösterir. Cr(III) formu uygun miktarlarda insülin aktivitesi için gereklidir fakat Cr(VI), Cr(III)'den 300 kat daha toksik olup [4] DNA hasarına neden olur [6]. Aynı zamanda tehlikeli, toksik, kanserojen ve mutajendir [7]. Bu nedenlerden dolayı kromu atık suların uzaklaştırmak ve canlı sistemlerin metabolizmasına girmemesi adına birçok yöntem geliştirilmiştir. Kimyasal çöktürme, elektrodiyaliz, membran filtrasyonları gibi çeşitli ekstraksiyon yöntemleri bunlardan bazılarıdır [1].

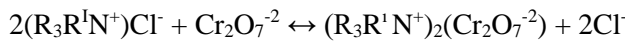
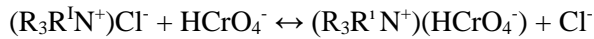
Membran teknolojisinin geçmişi 18. yüzyıla kadar dayansa da en önemli gelişmeler son 50 yıl içerisinde gerçekleşmiştir. Ayrıca nanoteknolojinin de gelişmesi ile birlikte membranların özelliklerinin daha iyi olması için çeşitli çalışmalar yapılmaya başlanmıştır.

Sıvı membran teknolojisi çözücü ekstraksiyonu ve membrana dayalı teknoloji sistemini bir araya getirmiş aynı zamanda geleneksel yöntemlere de bir alternatif olarak sunulmuştur [8]. Sıvı membranların verimi nispeten diğer membran türlerine göre yüksek olması onu endüstriyel uygulamalarda sıklıkla kullanılan bir proses haline getirmiştir [9].

Sıvı membranların yığın, emülsiyon, destekli ve polimer içerikli olmak üzere dört farklı uygulama şekli bulunmaktadır [14]. Bu uygulama şekillerinden biri olan destekli sıvı membran (SLM) teknolojisi, ekstraksiyon ve sıyırma işlemlerini tek adımda birleştirdiği için tercih sebebi haline gelmiştir [10],[13]. Destekli sıvı membran tekniği ile sulu metal çözeltileri donör fazdan, membranın kılcal gözenekleri tarafından tutulan organik hidrofobik destek maddesi aracılığı ile akseptör faza taşınımı gerçekleşir [11], [12].

Membran teknolojisinin alternatif metodlarından biri olan sıvı membran tekniği diğer membran uygulamalarıyla karşılaştırıldığında basit kullanım, yüksek verimlilik, daha geniş ara yüzey alanı ve çözeltilerden farklı özelliklerdeki maddelerin çekilmesi için etkili sistemler olması nedeniyle ayırma teknolojisi ve saflaştırma proseslerinde çok önemlidir [15-17].

SLM'de organik çözücü yani membran sıvısı seçimi sistemin doğru şekilde çalışması açısından çok önemlidir. Taşıyıcı, meydana gelecek olan kompleks için yeterli çözücülükte olmalı ve çalışma sıcaklığında da buharlaşmaması istenmektedir [11]. Aliquat 336 kullanılarak Cr (VI) taşınım reaksiyonu aşağıdaki denklem ile temsil edilir;



Düşük taşıyıcı derişimlerinde yeteri kadar ara yüzeyde metal/taşıyıcı kompleks oluşumu gerçekleşemediğinden taşınımı olumsuz etkilemektedir. Yüksek taşıyıcı derişimlerinde ise hareketliliği kısıtlayıcı yüksek vizkoziteye ulaşıldığından dolayı taşınım azalmaktadır.

2006 yılında Pedersen-Bjegaard ile Rasmussen ilk defa elektriksel potansiyel kuvveti altında desteklenen sıvı membran vasıtasıyla analitik olarak ekstraksiyon gerçekleştirilebileceğini göstermişlerdir [18]. Yüklü analitlerin elektrokinetik yer değiştirmesine dayanan yepyeni bir konseptle ortaya çıkan elektromembran prosesinde kütle aktarımını, elektrik potansiyel farkının itici güç olarak uygulanmasıyla gerçekleştirir [19]. EME genellikle düşük molekül kütlesi olan ve iyonlaşabilen maddelerin temizlenmesi ve ön işleme tabi olması için kullanılırken; tuzlar, proteinler ve diğer büyük moleküller gibi daha kompleks bileşenler SLM tarafından tutulur [20], [21]. 2006'dan bu yana yapılan araştırmalar elektro membran sistemlerinin gelecekte yapılacak çalışmalar için önemli bir yere sahip olduğunu göstermektedir. İtici kuvvet olarak güçlü bir elektrik alanı kullanıldığından, ekstraksiyon süreleri diğer membran tekniklerine oranla daha kısadır ayrıca SLM biyolojik ve çevresel atık numunelerinde bulunan birçok kompleks bileşeni için etkili bir bariyerdir ve EME ile birleştirilince oldukça kullanışlı hale gelerek sistemin seçiciliği elektrik alanının yönü ile kontrol edilebilir ve EME tarafından yüksek seviyede ayrılma sağlanır. Aynı zamanda SLM için çok az hacimlerde organik çözücü ihtiyacının olması bu proseslerin yeşil kimya olarak değerlendirilebilmesini sağlar [22-25].

Uygulamadaki önemli noktalardan biri SLM'ye emdirilecek olan organik çözücüdür. Bu çözücünün genel olarak suyla kompleks oluşturmaması, uçuculuğunun düşük olması, membran yüzeyinde hızlı şekilde kompleksleşme\dekompleksleşme özelliğine sahip olması [26] yüksek difüzyon katsayıları elde etmek ve analitlerin SLM boyunca hızlı bir kütle transferini yapması için düşük viskozite de olması gerekmektedir [25]. Ayrıca uygulanacak voltaj ve akım değerleri, karıştırma hızı, ortam sıcaklığı, besleme ve alıcı çözeltilerin pH'ları ve destek maddesinin morfolojik özellikleri gibi birçok parametre taşınım verimi üzerinde etkin rol oynamaktadır. Çalışmalarımızda uygulanacak voltaj değerleri ve destek maddesinin türü değiştirilerek taşınım verimini üzerinde durduk.

Çalışmamızda kullandığımız Celgard 2500 ve Celgard 2400 membranların polimerik yapısı (Polipropilen) aynı olmakla birlikte gözenek büyüklüğü ve yüzeyinde dağılım yüzdesi farklılıkları aşağıda verilmiştir [27].

**Tablo 1:** Celgard 2500 ve 2400 karşılaştırması

	<i>CELGARD 2400</i>	<i>CELGARD 2500</i>
Gözenek büyüklüğü (nm)	50 X 125	75 X 250
Gözenek dağılım yüzdesi	28-41	37-55

2000'li yıllardan sonra nanoteknolojinin gelişimi ile birlikte membranların özelliklerinin daha iyi olması için çeşitli çalışmalar yapılmaya başlanmıştır.

Gjelstad ve Pedersen (2015); İnsan plazmasından peptit kalıntılarının çıkarılması için yaptıkları çalışmada, ilk kez ince bir düz propilen membran esaslı düzenek ile peptitlerin ekstraksiyonu için EME'nin performansı incelenmiştir. Mevcut veriler dahilinde biyolojik metabolizmaya uygulanabilirliği hakkında büyük ölçüde karar vermişlerdir.

Kaya ve diğ. (2016), Cr (VI) 'nın sudan uzaklaştırılması için sabit DC elektrik akımında potansiyel ve akım etkisini araştırılarak Cr (VI) geçiriminin 40 dakika sonunda % 98.33 verimle geçişi sağlandığı bulunmuştur.

Vuslat Sarıkaya ve arkadaşları (2019) çalışmalarında, kromun SLM ile krom ve nikel karışımların ayrılması için taşıyıcı olarak TOA (tri-oktilamin), organik çözücü olarak kloroform, kerosen, sikloheksanı ve destek maddesi olarak da celgard 2500 ticari membranı kullanmışlardır. Yaptıkları 8 saatlik taşınım süreleri içinde optimum şartların tespitini yapmışlardır.

Bu çalışmamızda SLM tekniği ve elektromembran prosesini birleştirerek oldukça yüksek toksikliğe sahip Cr(VI) metal iyonunun seçimli olarak uzaklaştırılması üzerinde durduk. İki prosesin birlikte kullanılmasıyla taşıyıcı olarak kerosende çözülmüş Aliquat 336, işlem etkili bir şekilde gerçekleştirilmiş olup destek maddesi olarak Celgard 2500 ticari membranı kullanılmıştır.

Teknolojinin gelişmesiyle birlikte yapılacak çalışmalarda arıtma ve istenmeyen türlerin uzaklaştırılması gelecekte ayırma ve saflaştırma proseslerine katkı sağlayacaktır.

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

### 2.1. Kullanılan Malzeme ve Kimyasallar (Materials and Chemicals)

NaOH, kerosen, Aliquat 336 ve 1,5-difenilkarbazit Sigma-Aldrich, Potasyum dikromat Riedel-de Haen, sülfürik asit (%95-97) Fluka, hidroklorik asit (%37) Merck firmasından temin edilmiş ve tüm kullanılan kimyasallar herhangi bir işleme tabi tutulmadan analitik saflıkta kullanılmıştır. Fazların karıştırılmasını ve iyonların hareketlerinin hızlanmasını sağlayan karıştırıcı (JP Selecta 7001511, Almanya), Celgard 2500 ve Celgard 2400 destek membranları Celgrad Inc'den temin edilmiştir. Deneysel çalışmalarda EA-PS 91000-30 3U 3HE 10000 W (Viersen Deutschland) marka güç kaynağı kullanılmıştır ve absorbans belirlenmesinde Pg enstrument t-60 UV-Vis spektro fotometresi kullanılmıştır. Elde edilen kinetik verilerin hesaplanmasında Sigma Plot Software programından yararlanılmıştır.

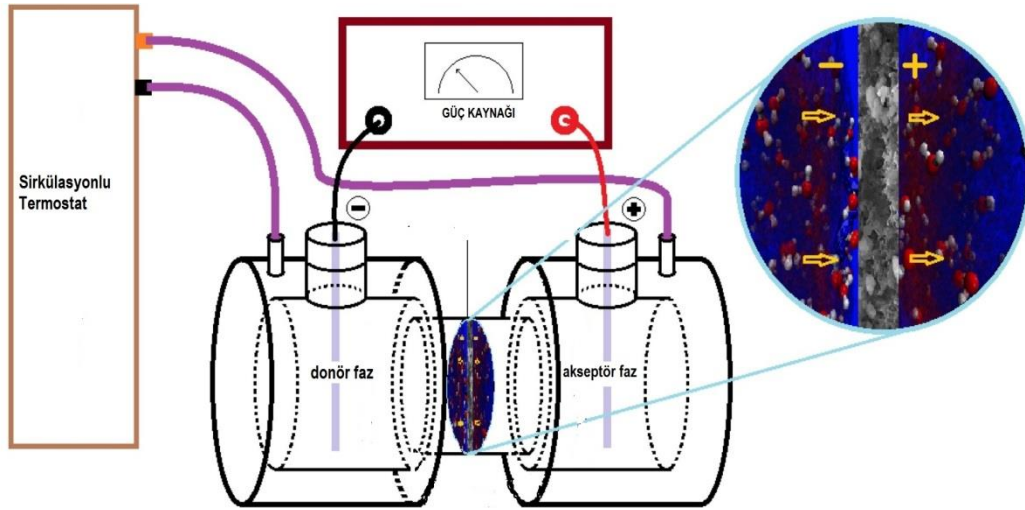
## 2.2. Membranların hazırlanması (Membranes Preparation)

Celgard membranlar (olduğu gibi kullanılmış olup Celgard 2500 membranı için ortalama kalınlık 25  $\mu$ , gözeneklilik oranı %41 ve yüzey alanı 9,08  $\text{cm}^2$ 'dir.) 24 saat, 5 mL kerosen ve  $3 \times 10^{-3}$  M Aliquat 336 ile hazırlanan çözelti içerisinde bekletilir. Daha sonra membranlar bir pens yardımıyla alınarak çözücüsü buharlaştırılarak difüzyon hücresine yerleştirilir.

## 2.3. EME-SLM taşınım deneyleri (EME-SLM transport experiments)

EME prosesiyle gerçekleştirilen Cr (VI) metal katyonunun taşınmasında kullanılan iki difüzyon hücresinin arasına hazırladığımız Celgard model membran yerleştirilir ve membranın kaymasını aynı zamanda çözeltilerden oluşabilecek sızıntıları önlemek amacıyla membran difüzyon hücresinin arasına bir conta ile sabitlenmektedir [28]. Alıcı çözeltilere taşınacak olan iyonik maddelerin türü elektriksel alanın yönüyle yakından ilgilidir. Anyonların taşınması isteniyorsa anot akseptör faz çözeltisinin içerisine, katyonların taşınması isteniyorsa katot akseptör faz çözeltisinin içerisine konulmalıdır. Elektrokinetik yolla gerçekleşen transport için her iki faz çözeltisine platin tel yerleştirilerek iyonik türlerin elektrokinetiksel göçünü sağlamak amacı ile kullanılan kaynağın katot ucu donör faz çözeltisine, anot ucu akseptör faz çözeltisine konulmuştur.

Her iki hücrede de deney boyunca karıştırıcı 100 rpm hızında çözeltileri karıştırarak iyon transferine yardımcı olmaktadır. (Karıştırıcı hızı belirlenirken cihazın harcadığı enerjide minimum tutularak en düşük seviyesinde karıştırma sağlanmıştır. Farklı rpm'ler denenip optimum değer olarak bulunmamıştır.) Düzenekte kullanılan sirkülasyonlu termostat difüzyon hücrelerinin çevresinde sıcaklık kontrolünü sağlamaktadır.



Şekil 1. EME-SLM deneylerinin şematik gösterimi [30].

Bölmelerden (donör faz) birinde hedef analiti içeren ( $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$  0,1 M HCl'de) besleme çözeltisi bulunurken diğer bölmede ise hedef analitin taşınacağı sıyırılma çözeltisi (akseptör faz) bulunmaktadır. Sıyırılma (akseptör) fazında 0,01 M NaOH çözeltisi bulunmaktadır.

10 V- 20 V- 30V- 40 V- 50 V- 60 V'da 0,3 A'de 100 dakika ekstraksiyon süresi boyunca her iki bölmeden de 10'ar dakikalık aralarla numuneler alınmıştır. Deneyler sabit tutulan sıcaklık ve karıştırma hızında ( $20^\circ\text{C}$ 'de 100 rpm karıştırma hızı) gerçekleştirilmiştir. Her iki fazdan alınmış örneklerin 0,5 mL'sinin üzerine 4 mL 0,1 M  $\text{H}_2\text{SO}_4$  ve 0,5 mL 1,5 difenilkarbazit ilave edilerek 15 dk bekletildikten sonra oluşan renkli kompleks çözeltisinin UV-Vis spektrofotometresinde absorpsanları okunmuştur.

Transport işlemi boyunca her iki fazdan belli zaman aralıklarında alınan numunelerden Cr(VI)'nın spektroskopik tayini yapılmıştır. Aynı işlemler Celgard 2400 membrana da uygulanmıştır.

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

Çeşitli potansiyel fark ve akım şiddeti uygulanarak gerçekleştirilen transport deneylerinde (donör faz 0,1 M HCl'de hazırlanmış  $2 \times 10^{-4}$  M  $K_2Cr_2O_7$ , akseptör faz 0,1 M NaOH, organik faz  $3 \times 10^{-3}$  M (75  $\mu$ l) Aliquat 336, karıştırma hızı 100 rpm ve ortam sıcaklığı 293 K) Çalışmada taşınım sıcaklığının etkisi araştırılmamış olup ortam sıcaklığı çalışmalar boyunca  $20^{\circ}C$ 'de sabit tutulmuştur. Celgard 2500 membranı için çeşitli kinetik parametreler hesaplanmıştır.

SLM'de transportun kinetiği 1. mertebeden reaksiyon kinetiği ile tanımlanmaktadır.

$$\ln\left(\frac{C}{C_0}\right) = -kt \quad 1$$

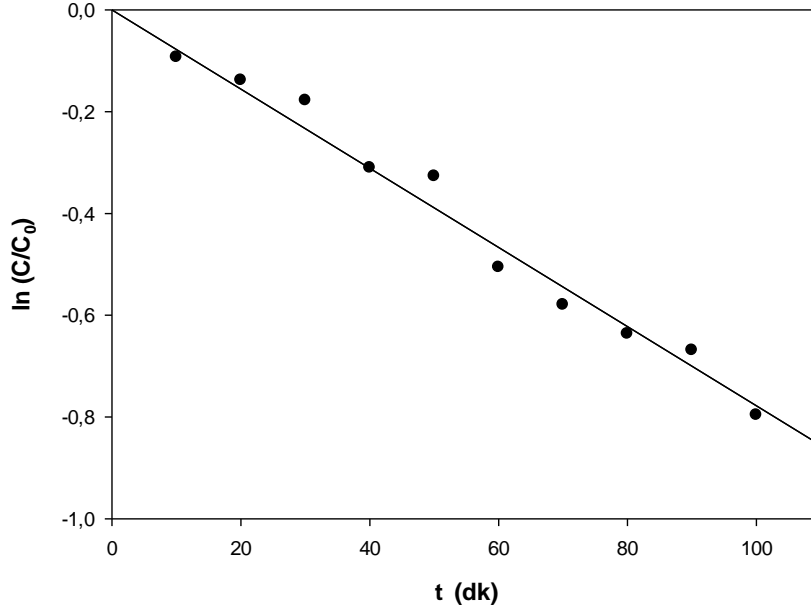
Eşitli [1]'de C, t anındaki donör fazdaki Cr(VI) konsantrasyonu  $C_0$ , donör fazdaki başlangıç derişimi, k hız sabiti ( $s^{-1}$ ), t ise transport süresidir.  $\ln\left(\frac{C}{C_0}\right) - t$  grafiğinin eğiminden k sabit değeri hesaplanabilir.

**Tablo 2.**  $\ln(C/C_0) - t$  grafiği verileri

t (dk)	$C/C_0$	$\ln C/C_0$
0	0	0
10	0,911	-0,0932
20	0,871	-0,1381
30	0,837	-0,1779
40	0,733	-0,3106
50	0,721	-0,3271
60	0,603	-0,5058
70	0,560	-0,5798
80	0,529	-0,6368
90	0,512	-0,6694
100	0,451	-0,7963

Farklı zamanlarda taşınım ölçülerek 1. mertebe kolerasyon sabiti yukarıdaki tabloda verilen bilgiler doğrultusunda eşitlik [1] kullanılarak çizilen  $\ln(C/C_0)-t$  grafiği şekil 2.'den  $r^2=0,9803608435$  olarak hesaplanmıştır.





Şekil 2.  $\ln(C/C_0)$ -t grafiği

Yukarıdaki çizilen grafik yalnızca 50V-0,3A için olup diğer tüm potansiyeller için ayrı ayrı çizilip kinetik verileri hesaplanmıştır.

$\ln\left(\frac{C}{C_0}\right)$  – t grafiği lineer olup bulunan k değeri eşitlik [2] geçirgenlik katsayısı olan P'nin bulunmasında kullanılmıştır.

$$P = \frac{V}{A}k \quad 2$$

Yukarıdaki eşitlikte V; donör hacmi, A ile ifade edilen ise membranın yüzey alanıdır. Başlangıç akış hızı olan (J) eşitlik [3] kullanılarak bulunmuştur [29].

$$J = P.C \quad 3$$

Geçirgenlik katsayısı yerine Eşitlik 6.3 yazıldığında aşağıda yer alan Eşitlik [4] elde edilmektedir.

$$J(\text{mol}/\text{cm}^2 \text{ s}) = \frac{V}{A}x \frac{dC}{dt} \quad 4$$

Donör fazdan Cr(VI) transportunun verimliliğinin hesaplanmasında kullanılmakta olan geri dönüşüm faktörü (RF) olan değer eşitlik [5]'den hesaplanır.

$$RF = \frac{C_i - C}{C_i} \times 100\% \quad 5$$

### 3.1. SLM-EME DeneYlerinde Potansiyel Güç (Volt) Etkisi (Electrical Potential (Volt) Effect in SLM-EME Experiments)

EME sisteminde yürütücü güç donör ve akseptör çözeltilerine yerleştirilen elektrotlarla SLM boyunca devam eden elektriksel potansiyeldir. Ayrıca harici bir güç kullanılması EME uygulamalarında birçok esneklik sağlamaktadır. Uygulanan elektriksel alanın değiştirilmesi hem büyüklük hem de yönü kolayca ayarlanabilmesini sağlar.

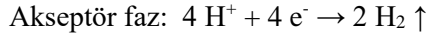
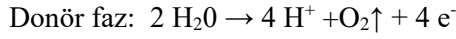
SLM-EME deneylerine ait kinetik veriler Tablo 3.'de verilmiştir.

**Tablo 3.** 0,3 A için Cr(VI) taşınımına voltaj etkisi.

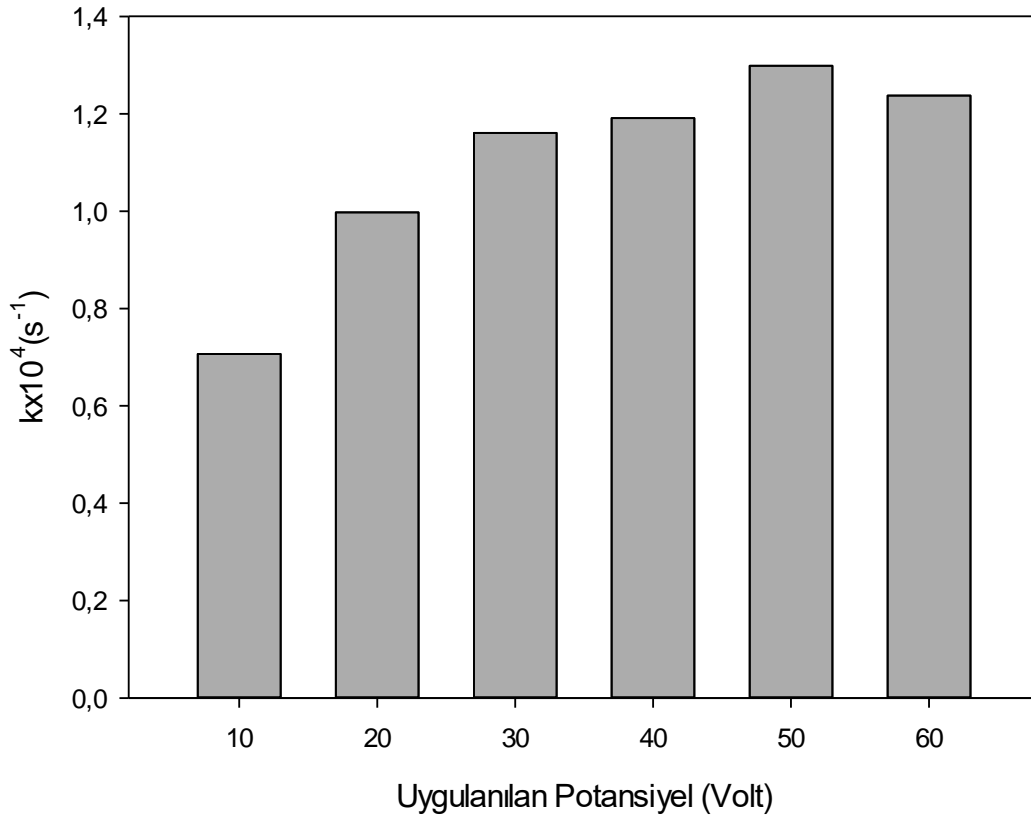
Uygulanan potansiyel (Volt)	$k \times 10^4$ ( $s^{-1}$ )	$P \times 10^6$ (m/s)	$J \times 10^6$ (mol/m <sup>2</sup> .s)	Geri kazanım faktörü (RF) (%)
10	0,7066	1,9261	0,2119	33,5392
20	0,9976	2,7192	0,2991	43,9160
30	1,1607	3,1638	0,3480	50,6485
40	1,1913	3,2473	0,3572	50,2779
50	<b>1,2985</b>	<b>3,5395</b>	<b>0,3893</b>	<b>54,8487</b>
60	1,2375	3,3731	0,3710	47,9308

Donör faz: 0,1 M HCl'de  $2 \times 10^{-4}$  M  $K_2Cr_2O_7$ , Celgard 2500 model membranda taşıyıcı olarak kerosende çözülmüş  $3 \times 10^{-2}$  M Aliquat 336, akseptör faz: 0,01 M NaOH, karıştırma hızı 100 rpm, sıcaklık 293 °K, transport süresi 100 dk.

EME'de taşınım verimi potansiyelin düşürülmesiyle azalmaktadır fakat, ekstraksiyon süresince belirli bir değerin üzerine çıktığında EME verimi düşebilmektedir. Bunun sebebi optimum voltaj değerlerinin üzerine çıktığında sistem akımının da artacağı ve elektrotlarda oluşabilecek elektrolizden kaynaklanmaktadır. Aşırı gerçekleşen elektroliz ortamı taşınım verimini azaltarak kararsız bir EME'ye sebep olmaktadır. Bunun sonucu olarak da gözlemlenen akım artışı donör ve akseptör fazlarda aşağıdaki reaksiyonlara göre pH değişimlerine yol açmaktadır.



50 V'a kadar SLM boyuncaki akımın ve diğer kinetik parametrelerin uygulanan potansiyel ile artması beklenen bir durumdur. 50 V'dan sonra yani optimum değerin üzerine çıktığında ekstraksiyon geri kazanımlarında belirtilen sebeplerden dolayı azalma görülmektedir.



**Şekil 2.** 0,3 A için  $k \times 10^4 (s^{-1})$  – potansiyel grafiği.

Gerçekleştirdiğimiz EME-SLM transport deneylerinde kullanılan destek materyalinin seçimi önemlidir. Bu nedenle elimizde bulunan ticari Celgard 2400 ve Celgard 2500 model membranların kıyaslanması amaçlanarak EME-SLM transport deneyleri gerçekleştirilmiştir ve elde edilen kinetik veriler Tablo 4.'de verilmiştir.

**Tablo 4.** Optimum şartlar için Celgard 2400 ve Celgard 2500 membranlarının kinetik verileri.

	<b>kx10<sup>4</sup></b> (s <sup>-1</sup> )	<b>Px10<sup>6</sup></b> (m/s)	<b>Jx10<sup>6</sup></b> (mol/m <sup>2</sup> .s)	<b>RF</b> (%)
CELGARD 2400	0,6660	1,3532	0,1110	34,3422
CELGARD 2500	<b>1,2985</b>	<b>3,5395</b>	<b>0,3893</b>	<b>54,8487</b>

Bu noktada Celgard 2500 ve Celgard 2400 model membranlar için gözeneklilik ve gözenek çap oranlarına bakmak gereklidir. Tablo 1.'de Celgard 2500 polimerik destek maddesinin gözeneklilik değerlerinin Celgard 2400'den daha yüksek olduğu ve çalışma verileriyle de sonuçların birbirlerine uyumlu olduğu görülmektedir. Gözeneklilik değerinin daha yüksek olduğu Celgard 2500 destek tabakasıyla yapılan deneysel çalışmalarda, daha yüksek verilere bununla birlikte de daha yüksek geri kazanım faktörü (%RF) elde edilmiştir.

#### 4. SONUÇ (CONCLUSION)

Gelişen ve kirlenen dünyada sadece bugünü değil, yarını da düşünme aynı zamanda kendini değil, parçası olduğumuz dünyayı da düşünmek gerekmektedir. Çağımız teknolojisinin bizden götürdüğü en önemli unsur zaman ve enerjidir. Gerçekleştirmiş olduğumuz EME-SLM proseslerinde zamandan ve enerjiden tasarruf sağlayarak 100 dakika gibi kısa bir sürede ve düşük voltajlarda enerji harcayarak Celgard 2500 model membran ile %50 üzerinde verim elde edilmiş, ticari olarak geliştirilecek olan su arıtım ve geri kazanım sistemleri için oldukça ilgi çekici bir çalışma yapılmıştır. Çalışmamızda kullanılan gözenek büyüklüğü ve dağılım yüzdesi farklı olan iki tip membran destek maddesi kullanarak bunların karşılaştırılması yapılmış az bir enerji sarfiyatıyla ve kısa bir sürede ekstraksiyon işleminin büyük bir bölümü gerçekleştirilmiştir. Ülkemizdeki endüstriyel tesislerin sistemlerinde bu proseslerin geliştirilerek kullanılması ekonomimiz için büyük katkılar sağlayacaktır.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Sellami, F., Kebiche-Senhadji, O., Marais, S., Couvrat, N., Fatyeyeva, K. Polymer inclusion membranes based on CTA/PBAT blend containing Aliquat 336 as extractant for removal of Cr(VI): Efficiency, stability and selectivity. *Reactive and Functional Polymers*, 139(January), 120–132. (2019)
- [2] Gündüz, T. (2004) *İnstrümental Analiz*, 4.Baskı, Gazi Kitabevi, Ankara s321-323.
- [3] Balkaya, T. (2017) Çok Damlacıklı Sıvı Membran ile Dikromat İyonu Ekstraksiyonunun İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli
- [4] Femina Carolin C., Senthil Kumar P., Saravanan A., Janet Joshiba G., Naushad M. Efficient Techniques for the Removal of Toxic Heavy Metals from Aquatic Environment: A Review Journal of Environmental Chemical Engineering, s2213-3437 (2017)
- [5] Pratush A., Kumar A., Hu Z. Adverse Effect Of Heavy Metals (As, Pb, Hg, And Cr) On Health And Their Bioremediation Strategies: A Review International Microbiology <https://doi.org/10.1007/s10123-018-0012-3> (2018)

- [6] Ni W., Huang Y., Wang X., Zhang J., Wu K. Associations Of Neonatal Lead, Cadmium, Chromium And Nickel Co-Exposure With DNA Oxidative Damage In An Electronic Waste Recycling Town <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.11.032> (2014)
- [7] Miretzky P. , Fernandez A. C. Cr(VI) and Cr(III) removal from aqueous solution by raw and modified lignocellulosic materials: A review Journal of Hazardous Materials, s1-19 (2010)
- [8] Onac, C. (2017) Polimer İçerikli Membranlar İle Bazı Metal Katyonlarının Yük Taşıyıcılı Ekstraksiyonu, Doktora Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli
- [9] Aslan, M. (2016) Membran Teknolojileri, 1. Baskı T.C. Şehircilik ve Çevre Bakanlığı Ankara s.1-15
- [10] Ashraf D. W., Mian A. Selective Separation And Preconcentration Studies Of Chromium(VI) With Alamine 336 Supported Liquid Membrane, Toxicological & Environmental Chemistry <https://doi.org/10.1080/02772240600668036> (2006)
- [11] Kırdı, İ. Farklı Metotlar Kullanarak Kaliks[4]Aren İle Membran Hazırlanması Ve Cr(VI)'Nın Atık Sulardan Uzaklaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü (2012)
- [12] Balchen M. , Gjelstad A. , Rasmussen K.E., Pedersen-Bjergaard S. Electrokinetic Migration Of Acidic Drugs Across A Supported Liquid Membrane, Journal of Chromatography A, s 220–225 (2006)
- [13] Durmaz, Ö. (2016) Sıvı Membran Tekniği İle Bazı Ağır Metal İyonlarının Ekstraksiyonlarının İncelenmesi, Doktora tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli
- [14] Altın, S. Sıvı Membran Sistemleriyle Kadmiyum Gideriminde Kullanılan Taşıyıcılar, Karaelmas Fen ve Müh. Derg. 6(1): s238-244, (2016)
- [15] Mulder, M., (1990). Basic principles of membrane technology, Kluwer Academic, Netherland, s1-363.
- [16] Othman, N. ,Goto M , Mat H., Liquid Membrane Technology For Precious Metals Recovery From Industrial Waste, Regional symposium on Membrane (2004)
- [17] Kaya, A. (2014) Polimer İçerikli membranlarda kompleksometrik yöntem kullanarak crMembranlarda Kompleksometrik Yöntem Kullanarak Cr(IV) Metal katyonunun taşınım kinetiğinin incelenmesiKatyonunun Taşınım Kinetiğinin İncelenmesi, Doktora Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli
- [18] Payan, M. R., Lopez, M. A. B. ,Torres, R. F., Navarro, M. V., Mochon, M. C. Electromembrane extraction (EME) and HPLC determination of non-steroidal anti-inflammatory drugs (NSAIDs) in wastewater samples, Talanta 85, s394–399 (2011)
- [19] Balchen, M., Reubsæet, L., Pedersen-Bjergaard, S. Electromembrane Extraction Of Peptides, Journal of Chromatography A, 1194 s143–149 (2008)
- [20] Šlampová, A., Kubáň, P., Two-Phase Micro-Electromembrane Extraction Across Free Liquid Membrane For Determination Of Acidic Drugs In Complex Samples, Analytica Chimica Acta, s 58-65 (2019)
- [21] Kubáň, P., Boček, P., Capillary Electrophoresis With Capacitively Coupled Contactless Conductivity Detection: A Universal Tool For The Determination Of Supported Liquid Membrane Selectivity In Electromembrane Extraction Of Complex Samples, Journal of Chromatography A Pages, s96-101, (2012)
- [22] Eng Eibaka, L. E., Gjelstada, A., Rasmussena, K. E., Pedersen-Bjergaarda S., Kinetic Electro Membrane Extraction Under Stagnant Conditions—Fast İsolation Of Drugs From Untreated Human Plasma, Journal of Chromatography A, 1217 s5050–5056, (2010)

- [23] Nojavan, S., Fakhari, A. R., Electro Membrane Extraction Combined With Capillary Electrophoresis For The Determination Of Amlodipine Enantiomers İn Biological Samples, Journal Of Separation Science, <https://doi.org/10.1002/jssc.2010002422>, (2010)
- [24] Payán, M. R., López, M. A. B., Torres, R. F., Navarro, M. V., Mochón, M. C., Electromembrane Extraction (EME) And HPLC Determination Of Non-Steroidal Anti-Inflammatory Drugs (Nsaid) İn Wastewater Samples, Talanta Volume 85, Issue 1, s 394-399, (2011)
- [25] Huang, C., Seip, K. F., Gjelstad, A., Pedersen-Bjergaard, S., Electromembrane Extraction For Pharmaceutical And Biomedical Analysis – Quo Vadis, Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis 113, s 97-107, (2015)
- [26] Uğur, A., (2015), polimer içerikli membranlarda makrosiklik taşıyıcılar kullanarak bazı metal kationlarının taşınım özelliklerinin incelenmesi, Doktora Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli
- [27] Garg, D. H., Lenk, W., Berwald, S., Lunkwitz, K., Simon, Z. F., Eichhornz, K. J., Hydrophilization Of Microporous Polypropylene Celgardb Membranes By The Chemical Modification Technique, s1-18, (1996)
- [28] Onaç, C., Kaya, A., Cr(VI)'nın grafen oksit bazlı polimer içerikli membran ile uzaklaştırılması, Pamukkale Univ Muh Bilim Derg, 24(7), doi: 10.5505/pajes.2018.54810, s1343-1347, (2018)
- [29] P. R. Danesi, L. Reichley-Yinger, C. Cianetti & P. G. Rickert Separation of cobalt and nickel by liquid-liquid extraction and supported liquid membranes with di(2,4,4-trimethylpentyl) phosphinic acid [cyanex 272], s781-814, (June 15, 1984)
- [30] Kaya A., Onac C., Alpoguz H. K., A Novel Electro-Driven Membrane For Removal Of Chromium İons Using Polymer İnclusion Membrane Under Constant D.C. Electric Current - Journal of Hazardous Materials, s1-7, (2016)

## Performance Analysis of Error Correction Codes for Digital Interval Pulse Modulation Technique

 Kenan AYTEN\*  Mehmet SÖNMEZ 

Osmaniye Korkut Ata University Faculty of Engineering, Department of Electrical Electronics Engineering, 80010, Merkez/Osmaniye

### Graphical/Tabular Abstract

#### Article Info:

Research article

Received: 13/04/2020

Revision: 12/08/2020

Accepted: 13/08/2020

#### Highlights

- Communication.
- Modulation Techniques.
- Error Correction.

#### Keywords

 VLC  
 DPIM  
 SER  
 Demodulator

In this study, an error correction structure is analyzed for the DPIM technique. Performance analysis of the error correction method has been successfully carried out. Analyzes were obtained for two cases: First, signal to noise ratio is used to observe the SER performance of system. Second, the comparison of SER performance is obtained with respect to distance between the receiver and transmitter. According to simulation results, it was seen that the error correction method give better results than that of traditional method in terms of error performance.

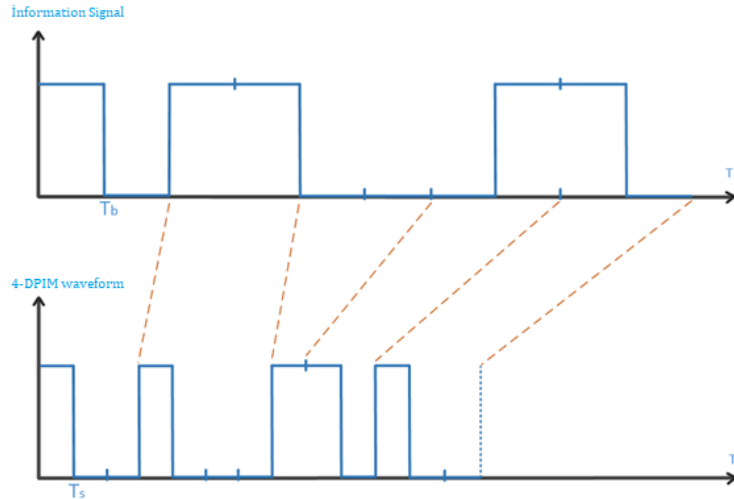


Figure A. 4-DPIM waveform according to information signal

**Purpose:** The main purpose is to analysis the error performance rate of the DPIM technique.

**Theory and Methods:** An error correction algorithm has been implemented on DPIM technique by using symbol structure of modulation method. Firstly, a theoretical framework is presented for error correction algorithm. Afterwards, the BER performances of systems are compared with each other.

**Results:** It has been observed that the error correction structure gives a better result than the traditional method between 16-27 SNRs. Moreover, it is seen that the error correction structure provide longer distance between the receiver and transmitter when compared to traditional system.

**Conclusion:** DPIM technique is a very good modulation technique in terms of bandwidth and power efficiency. However, it needs to be developed in terms of error performance and frame synchronization, because it is an asynchronous modulation technique. Therefore, improving the DPIM technique in terms of error performance will make it more attractive.



# Dijital Aralıklı Darbe Modülasyonu Tekniği için Hata Düzeltme Kodlarının Performans Analizi

Kenan AYTEN\* Mehmet SÖNMEZ

*Osmaniye Korkut Ata University Faculty of Engineering, Department of Electrical Electronics Engineering, 80010, Merkez/Osmaniye*

## Öz

Günümüzde gelişen teknolojiler ve hızlı bilgi aktarımı nedeniyle kablosuz haberleşmede Radyo Frekansı (RF: Radio Frequency) bantları hızla dolmakta ve frekans bandının üst sınırlarına doğru ulaşmaktadır. Bu durum yeni alternatif iletişim teknolojilerine olan ilgiyi arttırmaktadır. Bu nedenle kısa mesafelerde RF üzerindeki veri trafiğini hafifletmek için Görünür Işık Haberleşmesi (VLC: Visible Light Communication) devreye girmektedir. VLC sistemlerinde modülatör ve demodülatör tasarımı hata performansı, bantgenişliği verimliliği, güç verimliliği gibi özellikleri etkilediğinden dolayı çok önemli konulardan birisidir. Bu nedenle yapılan çalışmada VLC sistemleri için kullanılan DPIM (Digital Pulse Interval Modulation: Dijital Aralıklı Darbe Modülasyonu) tekniğinin performans analizi gerçekleştirilmiştir. Analizler MATLAB ortamında gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmada DPIM tekniğine hata düzeltme kodları entegre edilmiştir. Entegre edilen hata düzeltme kodlarının matematiksel alt yapısı oluşturularak, benzetim ortamında geleneksel sistem ile SER (Slot Error Ratio: Sembol Hata Oranı) ve PER (Packet Error Ratio: Paket Hata Oranı) karşılaştırılması yapılmıştır. Hata düzeltme kodları eklenmiş olan alıcı yapısının geleneksel DPIM alıcı yapısına göre daha iyi bir hata performansı sergilediği görülmüştür. Bu nedenle benzetim sonuçlarından hata düzeltme kodlarının geleneksel yapıya göre daha yüksek alıcı-verici arasındaki mesafeler için veri iletimini sağlanabildiği görülmektedir. Özellikle sabit eşik değeri uygulamasında hata düzeltme yapısının hata performansını oldukça yüksek bir şekilde geliştirdiği görülmektedir.

## Makale Bilgisi

*Araştırma makalesi*  
*Başvuru: 13/04/2020*  
*Düzeltilme: 12/08/2020*  
*Kabul: 13/08/2020*

## Anahtar Kelimeler

VLC  
 DPIM  
 SER  
 Demodülatör

## Keywords

VLC  
 DPIM  
 SER  
 Demodulator

## Performance Analysis of Error Correction Codes for Digital Interval Pulse Modulation Technique

## Abstract

Nowadays, Radio Frequency (RF) bands in wireless communication have been rapidly filled and reached the upper limits of the frequency band due to the high data rate and developing technologies. This situation increases the interest on new alternative communication technologies. Hence, the VLC (Visible Light Communication) comes into play to mitigate data traffic over RF for short distances. The design of modulator and demodulator design in VLC is one of the most important issues because it affects features such as error performance, bandwidth efficiency, power efficiency. Therefore, the performance analysis of DPIM (Digital Pulse Interval Modulation) technique used for VLC systems was performed in this paper. The analyzes were carried out in MATLAB environment. In the study, error correction codes are integrated into DPIM technique. By achieving the mathematical infrastructure of the integrated error correction codes, a comparison of the conventional system with SER (Slot Error Ratio) and PER (Packet Error Ratio) was obtained in the simulation. The proposed receiver structure has been shown to perform better than traditional DPIM receiver structure. Therefore, it can be seen from the simulation results that the error correction codes can be transmitted to the traditional structure for higher transmission distance. Especially, it is seen that the error correction structure considerably improves the error performance for constant threshold value application.



## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

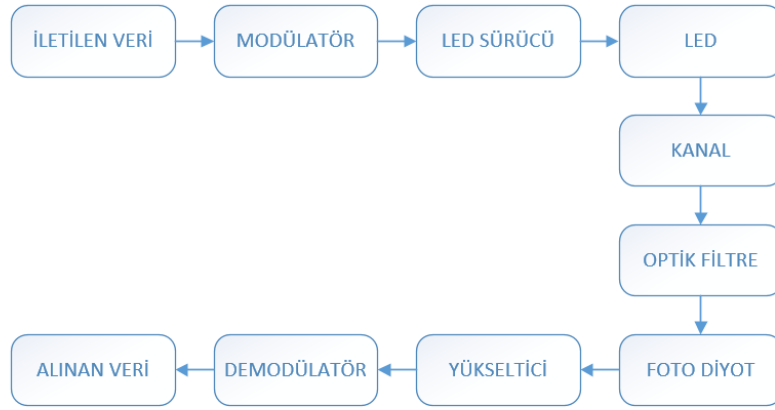
Sınırlı radyo frekansı (RF: Radio Frequency) spektrumu, son zamanlarda mobil veri trafiğindeki olağanüstü artış ile her yerde bağlantı ve yüksek kapasite için artan talebi karşılamakta zorlanmaktadır. Nesnelerin İnternetinde bulunan çok sayıda cihazın da artan mobil veri trafiğine katılmasıyla kablosuz ağlar üzerinde RF spektrumu yetersiz kalmakta ve gecikme süresi nedeniyle hizmetin güvenilirliğini azaltmaktadır[1]. Bu durum yeni alternatif iletişim teknolojilerine olan ilgiyi arttırmaktadır. Bu amaçla kısa mesafelerde RF üzerindeki veri trafiğini hafifletmek için VLC devreye girmektedir. VLC sistemlerinde bilgi görünür ışık aracılığıyla iletilmektedir. Görünür ışık 430 THz ile 790 THz arasında değişen bir frekansa sahiptir. Görünür ışık haberleşmesinde verici olarak LED (light emitting diode) gibi ışık yayan, enerji tasarruflu, düşük maliyetli ve sürdürülebilir opto-elektronik cihazlar kullanılır[2]. Alıcı kısmında ise foto diyot gibi ışığa duyarlı cihazlar kullanılır. VLC sistemlerinde iletilmek istenen bilgi sinyali modülasyon işleminden sonra verici tarafta bulunan LED'den yayılan ışık ile taşınır ve alıcı taraftaki foto diyot tarafından bilgi sinyali alınır. Alınan sinyal demodülasyon işlemine tabi tutulur ve veri gönderme işlemi tamamlanmış olur. VLC'nin en önemli özelliği veri aktarımı için aydınlatma amacıyla kullanılan görünür ışığı kullanmasıdır. VLC'nin en büyük dezavantajı alıcının, vericiden gönderilen ışığın görüş açısı içerisinde olması gerekliliğidir. Bu dezavantajla birlikte VLC'nin RF'den en büyük farkı, alıcı-verici arasındaki mesafenin kısa olmasıdır.

Literatürde VLC sistemlerinin araç-araç haberleşmesi, sualtı haberleşmesi, kapalı ortam haberleşmesi gibi birçok haberleşme alanında kullanılmasına yönelik akademik çalışmalar bulunmaktadır [3]. VLC sistemleri için literatürde önerilen modülasyon teknikleri ile güç verimliliği, bant genişliği verimliliği, hata oranı performansı gibi özelliklerin geliştirilmesi amaçlanmaktadır. Ağırlıklı olarak kullanılan Açma Kapama Anahtarlama (OOK: On-Off Keying), Darbe Konum Modülasyonu (PPM: Pulse Position Modulation), Darbe Genişlik Modülasyonu (PWM: Pulse Width Modulation) düşük veya orta veri hızları istendiğinde çok uygundur[3]. PPM tekniğinin VPPM (Variable PPM: Değişken PPM), DPPM (Differential PPM: Kademeli PPM), OPPM (Over lapping PPM: Çakışan PPM), MPPM (Multipulse PPM: Çoklu PPM) gibi birçok alt versiyonu bulunmaktadır[4]. Bunların haricinde literatürde Renk Kaydırmalı Anahtarlama (CSK: Color Shift Keying), Optik Ortogonal Frekans Bölmeli Çoklama (OOFDM: Optical Orthogonal Frequency Division Multiplexing), Sayısal Darbe Aralığı Modülasyonu (DPIM: Digital Pulse Interval Modulation) gibi birçok modülasyon tekniği daha bulunmaktadır[5]. Modülasyon teknikleri üzerine yapılan akademik çalışmalarla birlikte modülasyon teknikleri her geçen gün gelişmektedir.

Yapılan çalışmalar incelendiğinde DPIM (Digital Pulse Interval Modulation: Dijital Aralıklı Darbe Modülasyonu) tekniği birçok modülasyon tekniğine kıyasla bant genişliği verimliliği ve güç verimliliği bakımından oldukça verimli bir modülasyon tekniğidir[6]. Ancak DPIM tekniği asenkron bir modülasyon tekniği olduğu için bit hata oranı tespit etmesi oldukça zordur [6]. Bu nedenle yapılan bu çalışmada DPIM tekniğinin hata oranı performansı Sembol Hata Oranı (SER: Slot Error Ratio)'na ve Paket Hata Oranı (PER: Packet Error Ratio)'na bakılarak belirlenmiştir. Geleneksel yöntemde DPIM sinyallerinin tespiti sabit bir eşik değeri ile karşılaştırılarak yapılır [6]. Ancak sistemin bulunduğu ortamdaki gürültü oranına, alıcı-verici arasında mesafeye göre eşik değeri değişeceği için sabit eşik değeri bulunan sistemlerde hatalı algılanan semboller olacaktır, hatalı algılanan semboller hata performansını olumsuz etkilediği için istenmeyen bir durumdur. Birçok yönden verimli bir modülasyon tekniği olan DPIM tekniğinin hata performansı yönünden de verimli hale getirilmesi bu modülasyon tekniğinin kullanılmasını daha cazip hale getirmektedir[7]. Bu nedenle DPIM tekniğinde hata performansı geliştirmek üzere yapılan çalışmalar daha çok önem arz etmektedir[8]. Bu çalışmada, sabit eşik değerli DPIM sisteminin bu değişimlerden daha az etkilenmesini sağlamak için kullanılan bir sayısal hata düzeltme kodu mimarisinin tasarımı yapılmıştır ve bu tasarımın başarımlı analizi gerçekleştirilmiştir. Tasarımın oluşturulmasında DPIM tekniğinin doğasında bulunan bazı özelliklerden yararlanılmıştır. DPPM (Farksal Darbe Konum Modülasyonu) yöntemi için önerilen hata düzeltme kodunun bir benzeri olan yöntemin; DPIM sistemleri üzerindeki bit hata oranı performansı bu çalışmada incelenecek olup, matematiksel analizi gerçekleştirilmiştir[9]. Kullanılan hata düzeltme kodu dört sembol içerisinden oluşabilecek bir sembollük hatayı düzeltmektedir. Benzetim çıktılarından hata düzeltme kodunun hata oranı performansının geleneksel sisteme göre daha iyi olduğu görülmektedir.

## 2. VLC SİSTEM MODELİ (VLC SYSTEM MODEL)

Şekil-1'de ifade edildiği gibi, tipik bir VLC sistemi, verici tarafında LED ve alıcı uçta algılama amacıyla bir foto diyot kullanılarak gerçekleştirilebilir. Işık, kablosuz optik haberleşmede veri iletimi için bir araç olarak kullanıldığından, veriler LED'in ışık yoğunluğunu değiştirerek kodlanmaktadır. Genel olarak, LED'i sürmek için bir sürücü devresi kullanılır. Ayrıca, sürücü devresinin temel ön koşulu, LED'den geçen akım miktarını kontrol etmektir, farklı bir ifade ile LED'in parlaklık seviyesini ayarlamaktan sorumludur. Enerji tasarrufu açısından bu çok önemlidir. LED tarafından iletilen optik sinyal, kablosuz kanaldan yayıldıktan sonra, engellerin varlığı nedeniyle birkaç yansımadan geçtikten sonra, hem görüş hattı (LOS: Line Of Sight) hem de görüş hattı olmayan (NLOS: Non-Line Of Sight) bileşenler ile foto diyot tarafından alınır[10]. Bu nedenle optik filtre istenen bilgi sinyalini seçmek için önemli bir rol oynar ve güneş ışığı gibi ortam ışık kaynaklarının ve yapay ışık kaynaklarının etkisini büyük ölçüde azaltabilir[3].



**Şekil 1.** VLC Sisteminin Temel Blok Diyagramı

Foto diyot ışık yoğunluğunu elektrik sinyaline dönüştürür. Elektriksel sinyal bir akım-gerilim dönüştürücü yükselteç devresi ile yükseltilir ve eşik değeri ile karşılaştırılarak semboller tespit edilir. Tespit edilen semboller demodülatör mimarisi ile tahmin edilerek nihai çıktı olan veri elde edilir.

## 3. DİJİTAL ARALIKLI DARBE MODÜLASYONU (DIGITAL PULSE INTERVAL MODULATION)

DPIM tekniğinde bilgi bitlerine göre sembol uzunluğu değiştiği için DPIM tekniği asenkron bir dijital zaman darbeleri modülasyonu tekniğidir[11]. M-DPIM tekniğinde koruma sembolü kullanılmaz ise sıralı olarak en fazla M-1 tane '0' sembolü gelebilmektedir. Burada  $M = 2^n$  olarak ifade edilmekte olup, n değeri bir sembol içerisinde bulunan bit sayısını göstermektedir. Koruma sembolünün kullanılmasının amacı, semboller arasındaki girişimi azaltmaktır[12]-[13]. Bu nedenle, 1 koruma sembolü kullanılması durumunda sıralı olarak en fazla M adet '0' sembolü gelmektedir. Tablo-1 ve Tablo-2'de bu durum görülmektedir.

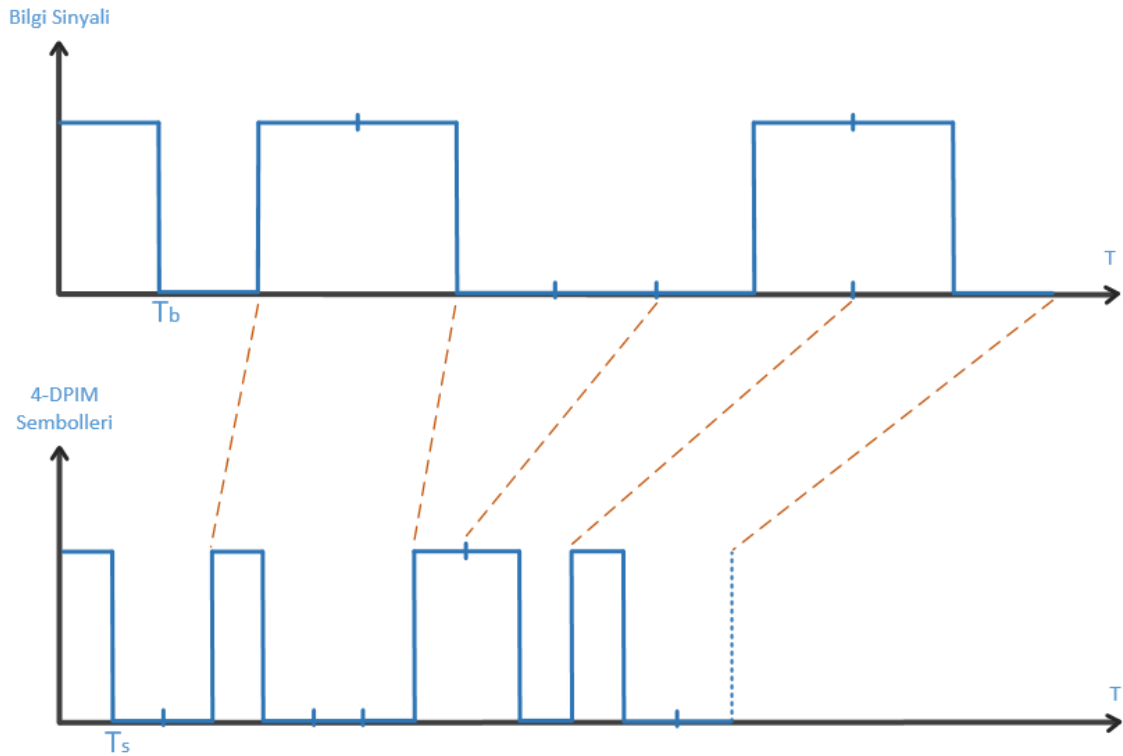
**Tablo 1.** 4-DPIM İçin Kod Dizini

Bilgi Bitleri	4-DPIM Sembolleri (Koruma Sembolü Olmadan)	4-DPIM Sembolleri (1 Koruma Sembolüyle)
00	1	10
01	10	100
10	100	1000
11	1000	10000

**Tablo 2.** 8-DPIM İçin Kod Dizini

Bilgi Bitleri	8-DPIM Sembolleri (Koruma Sembolü Olmadan)	8-DPIM Sembolleri (1 Koruma Sembolüyle)
000	1	10
001	10	100
010	100	1000
011	1000	10000
100	10000	100000
101	100000	1000000
110	1000000	10000000
111	10000000	100000000

Tablo-1 ve Tablo-2 farklı uzunluklardaki bilgi bitlerini kodlayan DPIM yöntemlerini göstermektedir. Ayrıca tablolarda bir (1) koruma sembolü DPIM sinyalleri gösterilmektedir. DPIM sinyalleri görüldüğü gibi her sembol başlangıcını mantıksal '1' seviyesi ile başlatarak diğer semboller için gelecek mantıksal '0' değerlerini de bilgi bitlerinin durumuna göre belirlemektedir. İletilecek olan mantıksal '0' sembolleri, Tablolarda verilen bilgi bitlerinin onluk sistemdeki değerine göre oluşturulmaktadır. Tablo-2'de n=2 için; '00' bilgi bitleri onluk sistemde sıfır (0) sayısına denk geldiğinden DPIM sembolü olarak sadece bir sembol yani mantıksal '1' sembolü iletilmektedir. Ancak '11' bilgi bitlerinin onluk sistemdeki değeri üç (3) olduğundan mantıksal '1' başlangıç sembolünden sonra 3 adet mantıksal '0' gönderileceğinden DPIM kod dizini '1000' olarak ifade edilmektedir. Koruma sembolünün eklenmesi durumunda, koruma sembolü sayısı kadar kodlanmış DPIM sinyale mantıksal '0' eklenmektedir.

**Şekil 2.** Bilgi Sinyaline göre DPIM Dalga Formu

Şekil 2'de bilgi sinyaline göre üretilen 4-DPIM dalga formu gösterilmiştir. Burada  $T_b$  bit gönderim süresini,  $T_s$  sembol gönderim süresini ifade etmektedir.

DPIM tekniğinde ortalama sembol uzunluğu koruma sembolünün olmadığı durumlar için eşitlik (1) ile 1 koruma sembolünün olduğu durumlar için (2) ile hesaplanabilmektedir[11].

$$\bar{L}_{DPIM} = \frac{2^M + 1}{2}$$

$$\bar{L}_{DPIM} = \frac{2^M + 3}{2} \quad 2$$

Matematiksel olarak M bit DPIM sinyali Eşitlik (3)'te görüldüğü gibi temsil edilebilir [14]. Burada a, DPIM sinyalinin iletimi için LED'çerisinden akan akımın genliğini, g(t) darbe şeklini temsil eder. T<sub>s</sub> ise bir sembolün iletimi için geçen süre olarak ifade edilmektedir.

$$x(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} a \cdot g \left[ t - T_s \left( 2k + \sum_{m=-\infty}^{\infty} S_m \right) \right] \quad 3$$

VLC sistemlerde iletilen ortalama optik güç (4)'deki ifade ile hesaplanırken alınan ortalama optik güç (5)'deki ifade ile bulunur[9]. Eşitlikte H(0) DC kanal kazancıdır. Eşitlik (6)'da ifade edilen h(t), kanal dürtü yanıtını göstermektedir.

$$P_t = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x(t) dt \quad 4$$

$$P_r = H(0) * P_t \quad 5$$

$$H(0) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) dt \quad 6$$

Bu çalışmada hata performansı analizi SER ve PER'e bakılarak yapılmıştır. SER hatalı algılanan sembol sayısı ile gönderilen sembol sayısının oranı ile bulunurken, DPIM tekniği için PER'i hesaplamak biraz daha zordur. Çünkü DPIM tekniği asenkron bir modülasyon tekniğidir.

$$P_{pe} = 1 - (1 - P_{sle})^{N_{pkt} \bar{L}_{DPIM}/M} \quad 7$$

Fakat eşitlik (7) ile SER'den PER elde edilebilmektedir[11]. Burada P<sub>pe</sub> paket hata oranını, P<sub>sle</sub> sembol hata oranını, N<sub>pkt</sub> ortalama paket uzunluğunu  $\bar{L}_{DPIM}$  ise ortalama sembol uzunluğunu ifade etmektedir. Bu çalışmada PER eşitlik (7) deki formül ile hesaplanmıştır.

#### 4. DPIM ALICI ŞEMASI (DPIM RECEIVER SCHEMA)

Geleneksel DPIM alıcı yapısında sembolleri tahmin etmek için alınan sinyalin integrali alındıktan sonra eşik değeri ile karşılaştırılarak eşik değerden büyük olan değerlere 1 küçük olan değerlere 0 sembolü atanır. VLC'de alınan sinyal, eşitlik (8)'deki gibi açıklanabilir [15].

$$s(t) = R(x(t) * h(t)) + n(t) \quad 8$$

Burada x(t) gönderilen sinyal, n(t) beyaz gauss gürültüsü ve R algılayıcı duyarlılığıdır. Eşitlik (9)'de gösterildiği gibi her sembol için alınan sinyalin integrali alınır. Burada n gönderilen toplam sembol sayısını, k ise sembolün numarasını ifade etmektedir.

$$a_k = \int_{(k-1)T_s}^{kT_s} s(t) dt \quad \{k \in Z, k > 0, k \leq n\} \quad 9$$

$$a(t) = [a_1 \ a_2 \ a_3 \ \dots \ a_{n-2} \ a_{n-1} \ a_n] \quad 10$$

İntegral sonucunda elde edilen sinyal karar aşamasında bir eşik değeri (th: threshold value) ile karşılaştırılır ve buna göre semboller tahmin edilir. Tahmin edilen semboller b(t) ile ifade edilmektedir ve yapılan matematiksel işlem eşitlik (11)'de görülmektedir.

$$b(t) = \begin{cases} 0, & a(t) < th \\ 1, & a(t) \geq th \end{cases} \quad 11$$

Tahmin edilen sembollerin tamamının doğru olması sonucunda DPIM kod dizisinden bilgi bitlerinin doğru bir şekilde algılanması, bir kod çözücü mimarisi ile sağlanabilmektedir. Sembollerin tespitinde kullanılan  $th$  değerinin belirlenmesi için, ideal ortamda (gürültünün olmadığı ortam) ve sabit koşullarda (sabit alıcı-verici arası mesafe ve sabit ortam ışığı)  $I$  bilgi biti gönderilir ve alıcının algıladığı değer yarısı bu koşullar için eşik değeri kabul edilir[16].

### 5. DPIM ALICI ŞEMASININ İÇİN HATA DÜZELTME KODUNUN UYGULANMASI (IMPLEMENTATION OF ERROR CORRECTION CODE FOR DPIM RECEIVER SCHEMA)

Bu bölümde kullanılan hata düzeltme kodlarının matematiksel ifadesi verilmiş olup sistemin akış diyagramı açıklanmıştır. Düzeltme kodları Eşitlik (12)-(13) kullanılarak ifade edilebilir.

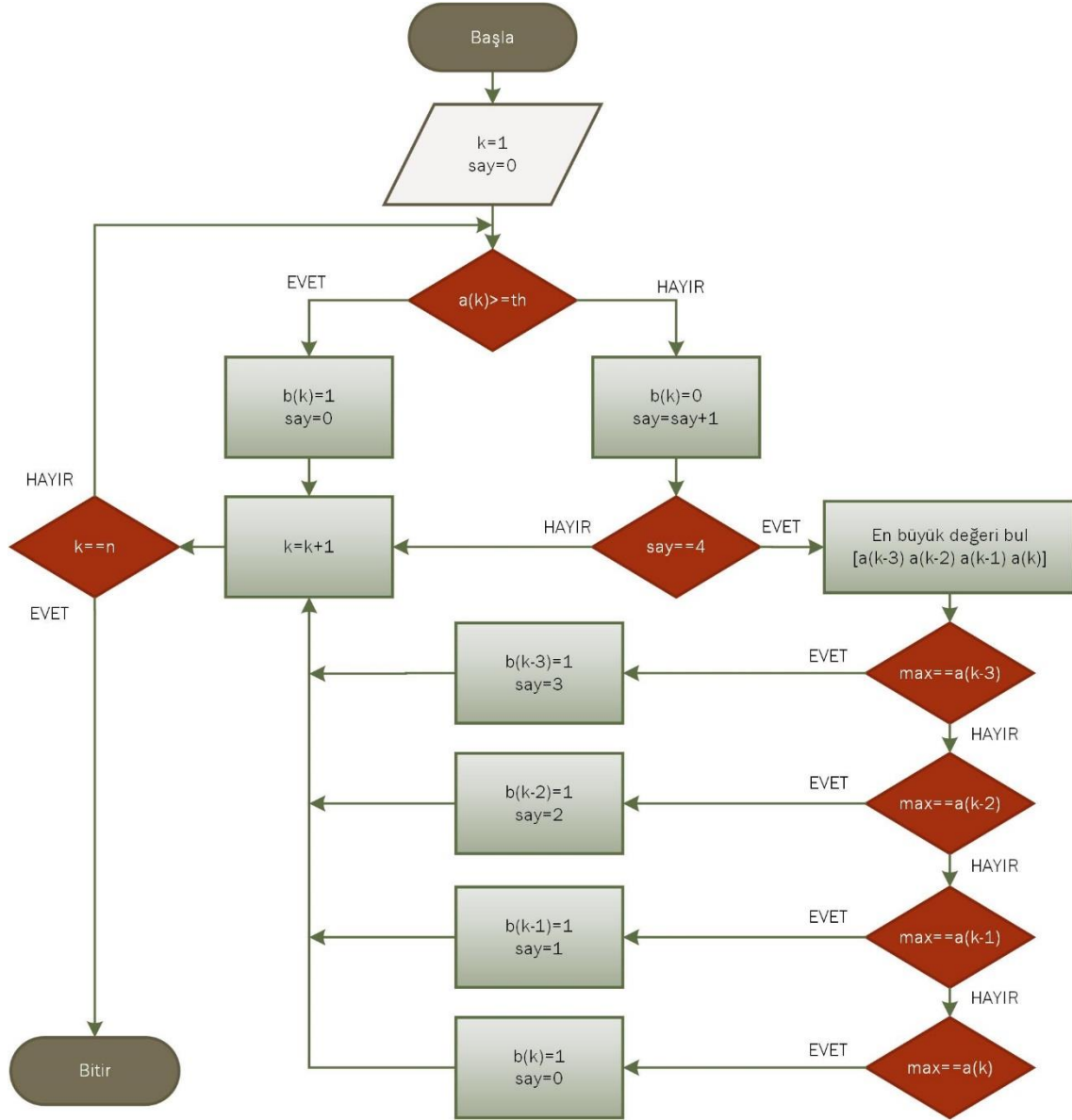
$$y = \sum_{i=1}^{i+2^M} b[i] \quad \{i \in \mathbb{Z}, i > 1, i \leq n - 2\} \quad (12)$$

Eşitlik (12) uygulanan hata düzeltme kodunun ifadesini vermektedir. Tamamen hatasız iletilen semboller için alınan DPIM sinyali için  $y$ 'nin minimum değeri 1 (bir) olmalıdır. Eğer  $y$  değeri 0 (sıfır) olursa, Tablo-1 ve Tablo-2'den art arda gelen  $2^M$  sembolden az birisinin hatalı olduğu bilinmektedir. Bu düzeltme kodu ile sadece 1 (bir) sembol düzeltimi yapılmaktadır. Düzeltme işlemi Eşitlik (13)'de verildiği gibi gerçekleştirilmektedir.

$$a_m = \max\{a_{i-1} \dots a_{i+2^M}\} \quad (13)$$

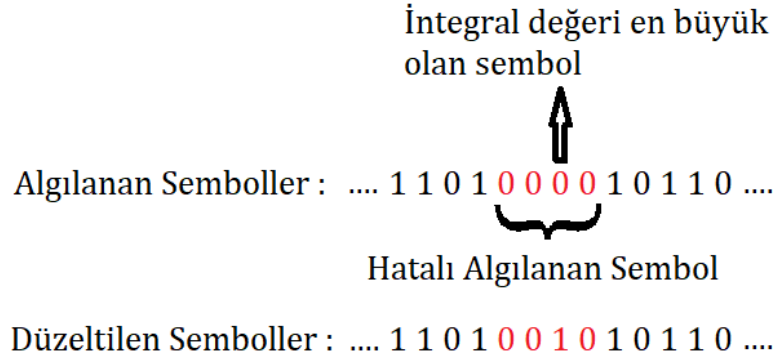
(13)'de verilen eşitlikte küme içerisinde  $2^M$  adet integral sonucu kullanılmaktadır. Mantıksal 0 olarak algılanan ve en büyük integral değerine sahip olan sembol değeri Mantıksal 1 olarak düzeltilmektedir. Eşitlikte  $m$  alt indisi en büyük değere sahip olan elemanın indisini göstermektedir. Bu nedenle düzeltme  $b_m=1$  işlemi ile gerçekleştirilir.

Hata düzeltme kodlu alıcı şemasında DPIM sembollerinin tespiti yine geleneksel yöntemde olduğu gibi yapılmaktadır. Geleneksel yönteme ek olarak tahmin edilen sembollerin hatalarını tespit etmek için hata düzeltme algoritması geliştirilmiş ve hata oranı performansının iyileştirilmesi sağlanmıştır. DPIM tekniğinin doğası gereği artarda gelebilecek maksimum 0 sembol sayısı bellidir. 4-DPIM için artarda en fazla 3 tane 0 sembolü gelmektedir. Hata düzeltme algoritması DPIM tekniğinin bu özelliğinden yararlanarak geliştirilmiştir. Geliştirilen hata düzeltme algoritmasının akış diyagramı Şekil 3'te gösterilmiştir.



**Şekil 3.** 4-DPIM için Hata Düzeltme Algoritması Akış Diyagramı

Akış diyagramında  $a(k)$  integrali alınan DPIM sinyalini,  $b(k)$  tespit edilen DPIM sembollerini ifade etmektedir. Gönderilen toplam sembol sayısı  $n$ , sembol sırası  $k$  ile ifade edilmiştir. Akış diyagramında görüldüğü üzere sembollerin tespiti geleneksel yöntemde olduğu gibi yapılmaktadır. İntegrali alınan sinyal eşik değeri ( $th$ ) ile karşılaştırıldıktan sonra ve eşik değerden büyük olanlara 1 sembolü küçük olanlara 0 sembolü atanır. Aynı zamanda her sembolün integral değeri hafızada tutulur. Sonrasında artarda 4 tane 0 sembolünün gelip gelmediğinin kontrolü yapılır. Artarda 4 sembolün 0 geldiği tespit edildiği zaman bu 4 sembol içerisinde integral değeri en büyük olana 1 sembolü atanır. En büyük değerden sonra kaç 0 olduğu bilgisi  $say$  ile hafızaya alınır ve bir sonraki döngüde ihtiyaç olması durumunda kullanılır. Akış diyagramının çalışma yapısının daha iyi anlaşılması için hata düzeltme algoritmasının çalışmasına dair bir örnek durum Şekil 4’de verilmiştir.



*Şekil 4. 4-DPIM için Örnek Hata Düzeltme*

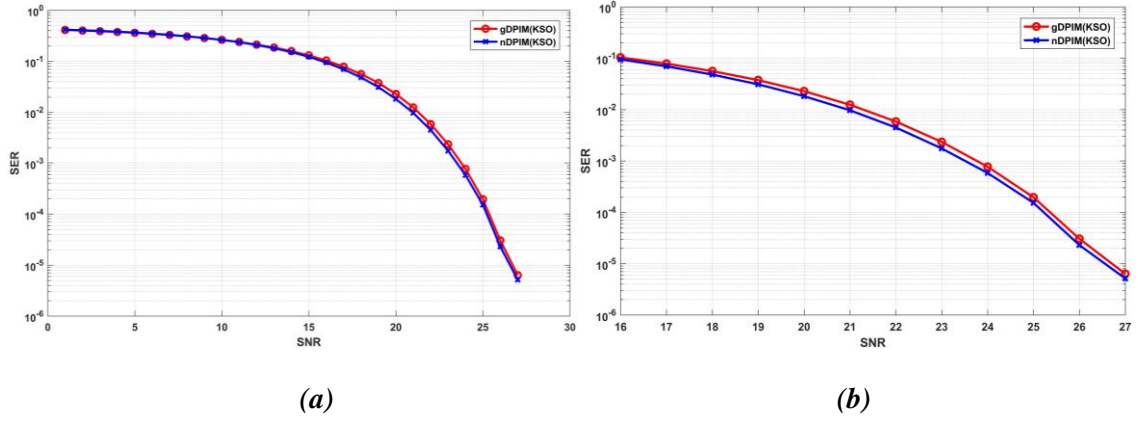
Şekil 4’de görüldüğü üzere art arda 4 tane 0 sembolünün gelmesi durumunda bu 4 sembol içerisinde integral değeri en büyük olan sembol 1 sembolüne dönüştürülüyor. Ayrıca akış diyagramındaki say değişkeni ile dönüştürülen 1 sembolünden sonraki 0 sembollerin sayısı hafızaya alınıyor. Böylece 5 veya daha fazla 0 sembolü art arda geldiği zaman düzeltilen sembolden sonra art arda 4 tane 0 sembolünün gelmesi de engelleniyor.

## 6. BENZETİM SONUÇLARI (SIMULATION RESULT)

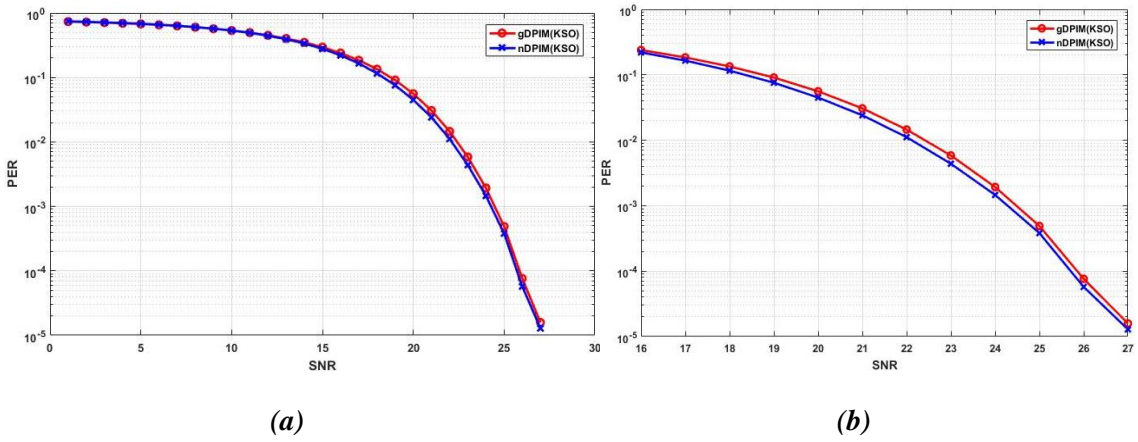
Bu bölümde, DPIM tekniği için hem hata düzeltme kodu kullanılarak hem de geleneksel yöntem kullanılarak elde edilen benzetim sonuçları incelenmiştir. Benzetim sonuçları, 4-DPIM (KSO: Koruma Sembolü Olmadan) ve 4-DPIM (1KS: 1 Koruma Sembolüyle) teknikleri kullanılarak gürültünün ve mesafenin değiştiği sistemler için elde edilmiştir. Benzetim sonuçlarında geleneksel DPIM alıcısı (gDPIM) ile kullanılan hata düzeltme algoritması eklenmiş olan DPIM alıcısı (nDPIM)’nin hata oranları karşılaştırılarak performans analizi yapılmıştır. Hata performans analizleri SER ve PER’e bakılarak yapılmıştır. Simülasyonlar çalışmaları 20000 defa gerçekleştirilmiş ve toplamda 8.000.000 bit veri gönderilmiştir. Hata performans analizleri, 20000 simülasyon çalışmasının ortalaması alınarak elde edilmiştir. Şekil (5) ve (6)’te sinyal gürültü oranı (Signal to Noise Ratio: SNR) değiştirilerek hata performans analizleri gerçekleştirilmiştir. Simülasyon çalışmaları 0-40 arası SNR için yapılmıştır fakat 27 SNR’den sonra SER ve PER 0’a düştüğü için 27 SNR’den sonrası simülasyon sonuçlarında gözükmemektedir.

Şekil 5 (a)’da koruma sembolünün olmadığı 4-DPIM tekniği için gürültü gücünün değişimine göre gDPIM ve nDPIM SER performansları karşılaştırılmıştır. Şekil 5 (b)’de 16-27 SNR arası SER verilerek Şekil 5 (a)’daki SER değişimin daha belirgin bir şekilde görülmesi amaçlanmıştır. Ayrıca Şekil 6 (a)’da koruma sembolünün olmadığı 4-DPIM tekniği için gürültü gücü değişimine göre gDPIM ve nDPIM PER performansları karşılaştırılmıştır. Şekil 6 (b)’de 16-27 SNR arası PER verilerek Şekil 6 (a)’daki PER değişimin daha belirgin bir şekilde görülmesi amaçlanmıştır.

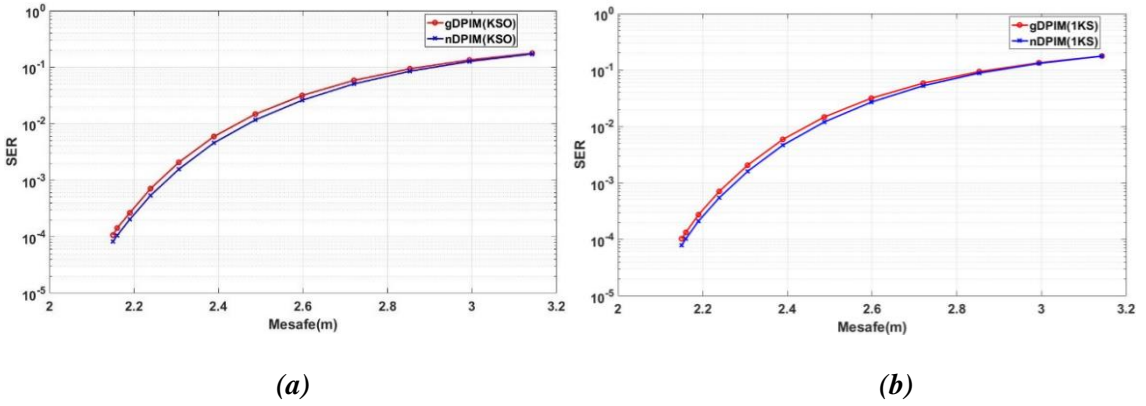
Şekil (7) ve (8)’de mesafeye göre hata performans analizleri gösterilmiştir. Şekil 7 (a)’da koruma sembolünün olmadığı 4-DPIM tekniği için mesafeye göre gDPIM ve nDPIM SER performansları karşılaştırılmıştır. Şekil 7 (b)’de 1 koruma sembolünün olduğu 4-DPIM tekniği için gDPIM ve nDPIM SER performansları karşılaştırılmıştır. Şekil 8 (a)’da koruma sembolünün olmadığı 4-DPIM tekniği için mesafeye göre gDPIM ve nDPIM PER performansları karşılaştırılmıştır. Şekil 8 (b)’de 1 koruma sembolünün olduğu 4-DPIM tekniği için gDPIM ve nDPIM PER performansları karşılaştırılmıştır.



Şekil 5. Gürültü gücü değişimine göre SER grafiği (a) 0-30 arası SNR için (b) 16-27 arası SNR için

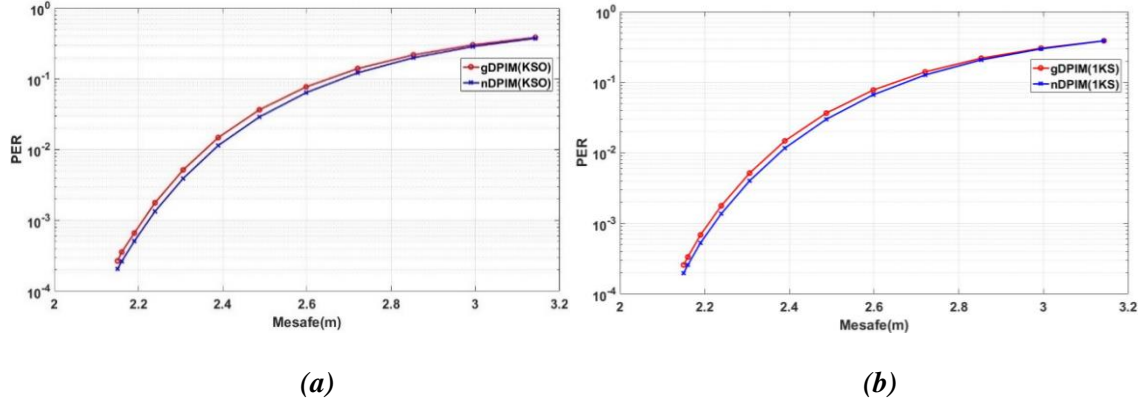


Şekil 6. Gürültü gücü değişimine göre PER grafiği (a) 0-30 arası SNR için (b) 16-27 arası SNR için

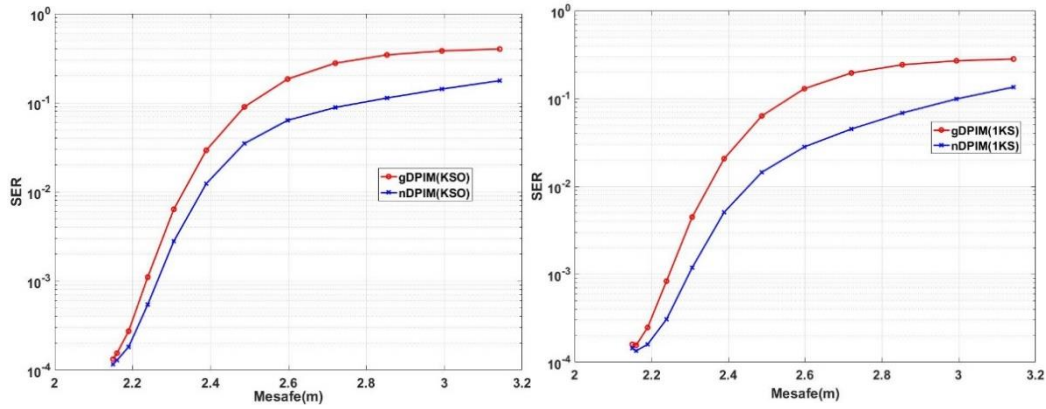


Şekil 7. Mesafeye göre SER grafiği (a) Koruma Sembolünün olmadığı durum (b) 1 Koruma Sembolü için



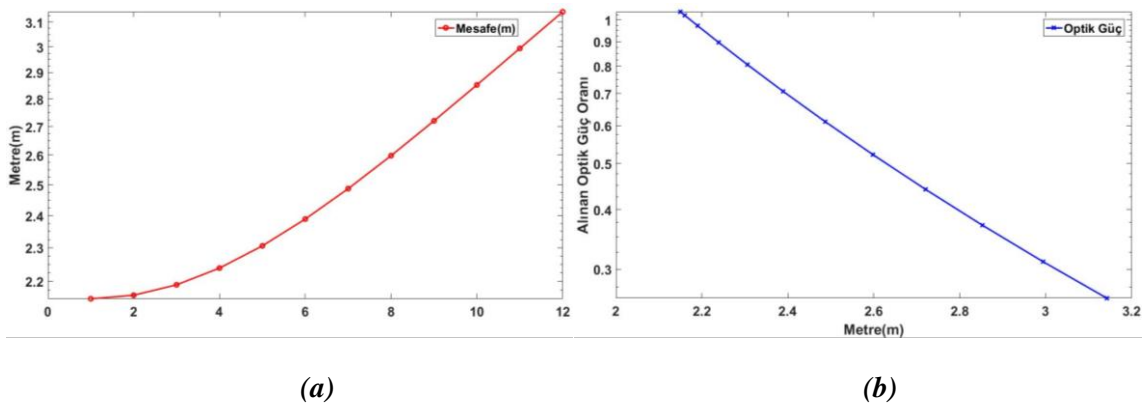


**Şekil 8.** Mesafeye göre PER grafiği (a) Koruma Sembolünün olmadığı durum (b) 1 Koruma Sembolü için



**Şekil 9.** Sabit eşik değeri için SER analizi (a) Koruma Sembolünün olmadığı durum (b) 1 Koruma Sembolü için

Şekil 9’de eşik değeri mesafe 2.17m için kullanılan eşik değeri olarak seçilmiş olup, alıcının eşik değerini doğru olarak tahmin edememesi durumu için analizler gerçekleştirilmiştir. Yani 3.2m ile 2.17m arasındaki tüm durumlar için eşik değeri 2.17m için kullanılan eşik değeri olarak seçilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi sabit eşik değeri durumu için geleneksel yöntemi kullanan sistem ile hata düzeltme kodu uygulanmış yöntemi kullanan sistem arasındaki performans farkı artmıştır.



**Şekil 10.** (a) Mesafenin değişimi (b) Mesafeye göre alınan optik güç oranı

Şekil 5, 6, 7, 8 ve 9’den görüldüğü gibi hata düzeltme kodları belirgin bir şekilde hata oranlarını düşürmektedir. Benzetim sonuçlarından elde edilen en önemli çıkarımlardan birisi hata düzeltme kodları kullanılarak, geleneksel sisteme göre daha uzak mesafelere aynı hata olasılığında veri iletiminin gerçekleştirilmesinin mümkün olmasıdır. Ayrıca benzetim sonuçlarından PER değerlerinin SER

değerlerine göre aynı SNR veya aynı mesafede daha yüksek değerlere sahip olmasıdır. Koruma sembolünün kullanılması ve kullanılmaması durumlarının PER ve SER üzerinde önemli bir etki oluşturmadığı görülmüştür. Şekil 10 (a)'da mesafenin değişimi, Şekil 10 (b)'de mesafeye göre alınan optik güç oranı (normalize edilmiş güç değeri) gösterilmiştir. Benzetim için kullanılan alıcı-verici arasındaki mesafe arttıkça alınan optik güçte düşüş olduğu izlenmiştir.

## 7. SONUÇ (CONCLUSION)

Yapılan çalışmada VLC sistemleri için DPIM tekniğinde hata düzeltme algoritması kullanılan bir alıcı şeması ile geleneksel alıcı şeması arasındaki performans karşılaştırmaları verilmiştir. Yapılan çalışmada hem SNR hem de alıcı-verici arasındaki mesafeye göre hata oranı analizleri gerçekleştirilmiştir. Benzetim sonuçlarından, kullanılan hata düzeltme kodlu sistemin geleneksel sisteme göre daha düşük sembol hata oranına ve paket hata oranına sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca PER ve SER arasındaki bağıntı kullanılarak elde edilen benzetim sonuçlarına göre DPIM için aynı mesafe ve SNR değerinde PER değerinin SER değerine göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Aynı hata olasılığı için, hata düzeltme kodları kullanılarak geleneksel DPIM yöntemine göre daha yüksek alıcı-verici mesafesinde veri iletiminin gerçekleştirilmesinin mümkün olduğu görülmüştür.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] I. F. Akyildiz, J. M. Jornet, and C. Han, "Terahertz band: Next frontier for wireless communications," *Phys. Commun.*, vol. 12, pp. 16–32, 2014.
- [2] J. G. Webster, A. R. Ndjiongue, H. C. Ferreira, and T. M. N. Ngatched, "Visible Light Communications (VLC) Technology," *Wiley Encycl. Electr. Electron. Eng.*, no. October 2017, pp. 1–15, 2015.
- [3] S. Vappangi and V. V Mani, "Concurrent illumination and communication : A survey on Visible Light Communication," *Phys. Commun.*, vol. 33, pp. 90–114, 2019.
- [4] S. Rajagopal, R. D. Roberts, and S. K. Lim, "IEEE 802.15.7 visible light communication: Modulation schemes and dimming support," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 50, no. 3, pp. 72–82, 2012.
- [5] L. U. Khan, "Visible light communication : applications , architecture , standardization and," *Digit. Commun. Networks*, vol. 3, no. 2, pp. 78–88, 2017.
- [6] Z. Ghassemlooy, A. R. Hayes, N. L. Seed, and E. D. Kaluarachchi, "Digital pulse interval modulation for optical communications," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 36, no. 12, pp. 95–99, 1998.
- [7] W. Chen, L. Wang, and C. Han, "Correcting Insertions / Deletions in DPPM Using Hidden Markov Model," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 46417–46426, 2020.
- [8] S. Guo, K. Park, and M. Alouini, "Ordered Sequence Detection and Barrier Signal Design for Digital Pulse Interval Modulation in Optical Wireless Communications," *IEEE Trans. Commun.*, vol. PP, no. c, p. 1, 2018.
- [9] U. Sethakaset and T. A. Gulliver, "Marker codes to correct insertion/deletion errors in differential pulse-position modulation for wireless infrared communications," *IEEE Pacific RIM Conf. Commun. Comput. Signal Process. - Proc.*, vol. 2005, pp. 181–184, 2005.
- [10] M. Bilim, "Karma Weibull/Log-Normal Sönümlenmeli Kanallın Hata Olasılığı Analizi," *Gazi Üniversitesi Fen Bilim. Derg. Part C Tasarım ve Teknol.*, vol. 7, no. 1, pp. 204–213, 2019.
- [11] Z. Ghassemlooy, W. Popoola, and S. Rajbhandari, *Optical Wireless Communications*, no. c. CRC Press, 2013.
- [12] A. R. H. and B. W. Z. Ghassemlooy, "Reducing the effects of intersymbol interference in diffuse DPIM optical wireless communications," *IEE Proc.-Optoelectron.*, vol. 150, no. 5, pp. 445–452, 2003.

- [13] J. Ma, Y. Jiang, S. Yu, L. Tan, and W. Du, "Packet error rate analysis of OOK, DPIM and PPM modulation schemes for ground-to-satellite optical communications," *Opt. Commun.*, vol. 283, no. 2, pp. 237–242, 2010.
- [14] Z. Ghassemlooy, "Digital Pulse Interval Modulation : Spectral Behaviour," *Digit. Signal Process. Commun. Syst.*, no. January 1997, 1997.
- [15] U. Sethakaset and T. A. Gulliver, "Differential amplitude pulse-position modulation for indoor wireless optical channels," *GLOBECOM - IEEE Glob. Telecommun. Conf.*, vol. 3, pp. 1867–1871, 2004.
- [16] C. Science, M. Baltimore, and C. Baltimore, "An Adaptive DPPM for Efficient and Robust Visible Light Communication Across the Air-Water Interface," in *Wireless and Optical Communication Conference (WOCC)*, 2020, vol. 29.

## Obtaining the $^{137}\text{Cs}$ Gamma Spectrum by Multi-pixel Photon Counter

 Elif Ebru ERMİŞ<sup>1,\*</sup>  Cüneyt ÇELİKTAŞ<sup>2</sup> 
<sup>1</sup> Izmir Tinaztepe University Vocational School of Health Services, Medical Imaging Techniques Services, 35400, Buca/IZMIR

<sup>2</sup>Ege University Faculty of Science, Physics Department, 35100, Bornova/IZMIR

### Article Info:

Research article

Received: 07/07/2020

Revision: 18/08/2020

Accepted: 21/08/2020

### Highlights

- Multi-pixel photon counter was used.
- $^{137}\text{Cs}$  gamma spectrum was achieved.
- To reduce the system noise applied method was used.

### Keywords

 Multi-pixel photon counter  
 $^{137}\text{Cs}$   
 Gamma spectrum

### Graphical/Tabular Abstract

To reduce high noise in the original gamma spectrum and reveal photopeak of the source, the spectrometer was used in the following figure.

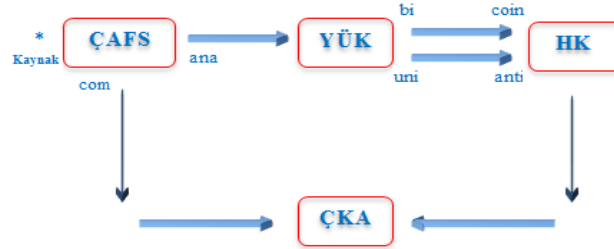


Figure A. Used spectrometer in this work.

**Purpose:** In this work, a method was asserted in order to reveal clear  $^{137}\text{Cs}$  gamma spectrum by multi-pixel photon counter (MPPC) due to its high noise.

**Theory and Methods:**  $^{137}\text{Cs}$  gamma spectrum by the MPPC was achieved directly and by using proposed spectrometer, respectively.

**Results:** Neat source spectrum by the proposed spectrometer was given.

**Conclusion:** It has been shown how a gamma spectrum can be achieved without electronic noise by using a MPPC. A different method to find a noiseless gamma spectrum with a better resolution by the MPPC was suggested.



## Çok Amaçlı Foton Sayıcı (ÇAFS) ile $^{137}\text{Cs}$ Gama Spektrumunun Elde Edilmesi

Elif Ebru ERMIŞ<sup>1,\*</sup> Cüneyt ÇELİKTAŞ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>İzmir Tınaztepe Üniversitesi, Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu, Tıbbi Görüntüleme Teknikleri Bölümü, 35400, Buca/İZMİR

<sup>2</sup>Ege Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, 35100, Bornova/İZMİR

### Öz

Bu çalışmada, çok amaçlı foton sayıcı (ÇAFS) kullanılarak oluşturulan spektrometre ile doğrudan  $^{137}\text{Cs}$  standart gama kaynağının spektrumu elde edilmiştir. Bu spektrum yüksek miktardaki sistem gürültüsü içinde kaldığından gama spektrumu görülememiştir. Bunu önlemek amacıyla yeni bir yöntem önerilmiştir. Bu yöntem vasıtasıyla, spektrumda ortaya çıkan sistem gürültüsü önemli düzeyde azaltılmış ve böylelikle doğrudan alınan spektrumda görülemeyen gama piki belirgin bir şekilde ortaya çıkarılmıştır. Mevcut çalışma ile kullanılan ÇAFS cihazının gama spektrumunun elde edilmesinde daha verimli bir şekilde kullanılabilmesi gösterilmiştir. Burada önerilen yöntem ile ÇAFS vasıtasıyla farklı tip standart gama kaynaklarının spektrumlarının elde edilebileceği sonucu ortaya çıkmıştır. Sonuç olarak, ÇAFS cihazıyla elektronik gürültüden arındırılmış, daha iyi bir çözünürlüğe sahip bir gama spektrumunun bulunması için farklı bir yöntem ileri sürülmüştür.

### Makale Bilgisi

Araştırma makalesi

Başvuru: 07/07/2020

Düzeltilme: 18/08/2020

Kabul: 21/08/2020

### Anahtar Kelimeler

Çok amaçlı foton sayıcı  
 $^{137}\text{Cs}$

Gama spektrumu

## Obtaining the $^{137}\text{Cs}$ Gamma Spectrum by Multi-pixel Photon Counter

### Keywords

Multi-pixel photon counter  
 $^{137}\text{Cs}$

Gamma spectrum

### Abstract

In this study, direct spectrum of  $^{137}\text{Cs}$  standard gamma source was obtained using multi-pixel photon counter (MPPC). Since this spectrum remained within the system noise, the gamma spectrum was not observed. In order to prevent this, a novel method was proposed. By the help of the method, the system noise that occurred in the spectrum was highly reduced, and thus the gamma peak that was not distinguished in the spectrum was revealed prominently. By the present study, it has been shown that MPPC can be used more efficiently in acquiring the gamma spectrum. It has been concluded that the spectra of different types of standard gamma sources can be acquired by this device through the proposed method here. Consequently, a different method to acquire a gamma spectrum cleaned by the electronic noise with better resolution by the MPPC was proposed.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Çok amaçlı foton sayıcı (ÇAFS), yarı iletken bir malzemeden (Si) üretilmiş ve foton sayımı için kullanılan bir cihaz olup, geiger modunda çalıştırılan birden fazla pikselden oluşan bir çeşit diyot şeklinde tanımlanabilir. ÇAFS'nın düşük çalışma voltajında çalıştırılabilmesi, oldukça iyi foton sayımı kapasitesine sahip olması, yüksek kazanç değeri, hızlı cevap zamanı, mükemmel zaman çözünürlüğü ve manyetik alana duyarlı olmaması gibi özelliklerinden dolayı bu cihazın farklı uygulama alanlarında kullanılması mümkün olmaktadır. Bu uygulama alanları arasında, DNA analiz ölçümleri, yüksek enerji fiziği deneyleri, yeni nesil PET (positron emission tomography) sistemleri yer almaktadır. ÇAFS'da her piksel, bir foton algıladığında aynı genlikte bir puls oluşturur. Birden çok sayıdaki piksel tarafından üretilen pulslar, birbiri üzerine bindirilerek çıkış pulsu meydana getirilmiş olur [1]. ÇAFS'nın çalışma şekli kısaca bu şekilde özetlenebilir.

ÇAFS cihazı aynı zamanda Si fotoçoğaltıcı (SiFC) olarak da bilinmektedir. Bu elektronik sensörler ile yapılan araştırma çalışmaları günümüzde hızla devam etmektedir. Çeşitli tiplerde sintilatörler

(parıldayıcı) kullanılarak ÇAFS'nin dedeksiyon performansını artırma çalışmaları [2,3], x ışını ve gama ışını ölçümü [4, 5], yüksek enerji astrofizik deneyleri [6, 7], nükleer tıpta pozitron emisyon tomografisi deneyleri [8, 9, 10, 11] ve kozmik müon dedeksiyonu deneyleri [12, 13] için ÇAFS halen artan bir hızla kullanılmaktadır. Bundan dolayı ÇAFS dedeksiyon verimini artıracak her türlü çalışma büyük öneme sahiptir.

Bir radyoaktif kaynaktan yayımlanan parçacıklar tarafından üretilen puls yükseklik dağılımını yani enerji spektrumunu elde etmek için çok kanallı analizör (ÇKA) denilen cihazlar kullanılmaktadır. ÇKA, gelen sinyalleri genliklerine göre ayırır ve hafızasında her bir genliğe karşılık gelen bir adres tanımlar. Bu adres kanal numarası olarak adlandırılır [14]. Başka bir ifade ile ÇKA gelen analog sinyalin genliğine karşılık gelen bir dijital sayıya dönüştürme prensibine dayalı olarak çalışır [15].

Spektroskopi, radyoaktif bir kaynaktan veya nükleer bir reaksiyon tarafından üretilen parçacıkların enerji dağılımlarının elde edildiği radyasyon ölçümlerinin bir koludur. Spektroskopide, enerji ölçümleri için kullanılan dedeksiyon sisteminin performansının kalitesi ise puls yükseklik dağılımının genişliği ile karakterize edilir [14]. Bu da enerji çözünürlüğü büyüklüğü ile tanımlanır. Enerji çözünürlüğü (EÇ), pikin en yüksek sayımının yarısındaki genişlik değerinin (YMG), pikin en yüksek sayımının alındığı kanal numarasına (KN) bölünmesiyle hesaplanır. EÇ enerji biriminde verilebileceği gibi aynı zamanda yüzde (%) cinsinden de ifade edilebilir [15, 16].

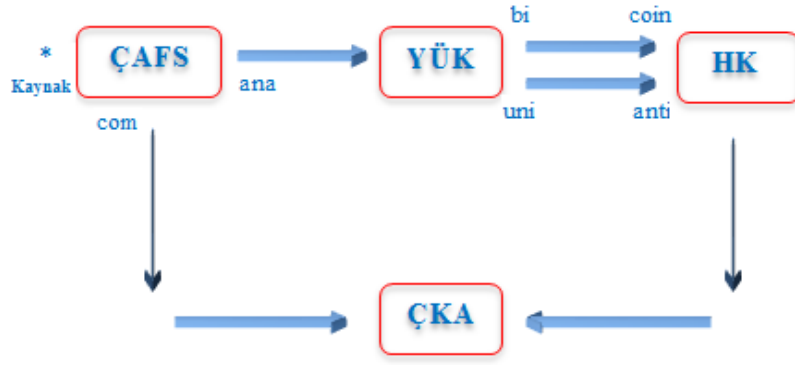
Laboratuvarımızda bir yarı iletken çok amaçlı foton sayıcısı (ÇAFS) bulunmaktadır. Bu cihaz, gama radyasyonu dedeksiyonu için kullanılmaktadır. Ancak, cihazdan alınan gama kaynak spektrumunda yüksek seviyede elektronik gürültü ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle, gama spektrumu net olarak elde edilememektedir. Bundan dolayı, bu çalışmada; söz edilen elektronik gürültü miktarı azaltılmak suretiyle, bir  $^{137}\text{Cs}$  standart radyoaktif kaynağının gama fotopikinin ortaya çıkarılarak daha net ve daha iyi bir çözünürlüğe sahip bir gama spektrumunun bulunması için bir yöntem önerilmesi amaçlanmıştır.

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

ÇAFS cihazı ile bir  $^{137}\text{Cs}$  nokta kaynağının doğrudan gama spektrumu şekil 1'de verilmiştir. Bu şekilde, yatay eksen ÇKA'nın kanal numarasını, düşey eksen de her bir kanal başına düşen sayım sayısını ifade etmektedir. Görüldüğü gibi bu spektrumda yüksek gürültü nedeniyle gama fotopiki elde edilememiştir. Benzer durum O.J. Roberts'in doktora tezinde (şekil 5.3) farklı tip bir SiFÇ kullanılarak elde edilen  $^{137}\text{Cs}$  gama kaynak spektrumunda da aynı şekilde ortaya çıkmıştır [17]. Bu sebeple, spektrumdaki yüksek gürültüyü azaltmak ve böylece kaynağın gama fotopikini ortaya çıkarmak için şekil 2'de gösterilen spektrometre tasarlanmıştır.



Şekil 1. ÇAFS cihazı ile alınan  $^{137}\text{Cs}$  kaynağının doğrudan gama spektrumu



Şekil 2. Çalışmada kullanılan spektrometrenin şekli

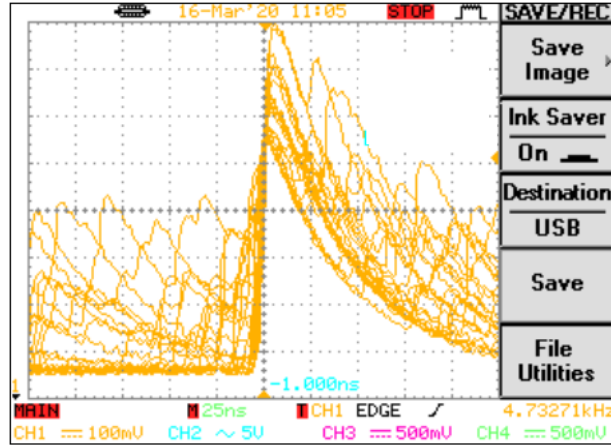
Bu spektrometrede, 5  $\mu\text{Ci}$  aktiviteye sahip  $^{137}\text{Cs}$  standart gama kaynağı kullanılmıştır. Spektrometrede çok amaçlı foton sayıcı (ÇAFS, Hamamatsu C10507-11-100U), yükseltici (YÜK, ORTEC 672), hızlı koincidens (HK, ORTEC 414A) ve çok kanallı analizör (ÇKA, ORTEC Easy MCA 2k) kullanılmıştır. Ölçüm süresi 100 saniye olarak belirlenmiştir.

ÇAFS yarı iletken bir cihaz olduğundan ışığa hassastır. Bu nedenle, spektrumlar alınırken sistem karanlık bir ortamda çalıştırılmıştır. Ayrıca, sıcaklığa bağlı olarak meydana gelebilecek fazla sayımların önüne geçebilmek için de sistem oda sıcaklığına yakın bir ortam sıcaklığında ( $21^{\circ}\text{C}$ ) tutulmuştur.

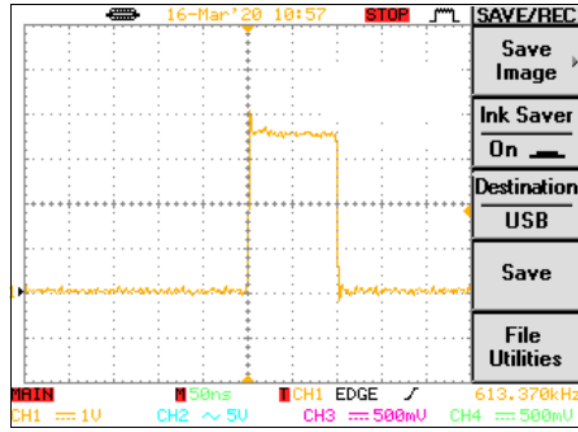
ÇAFS, USB kablosuyla PC'den gücünü almaktadır. ÇAFS'nin çalıştırılması ise PC'den gerçekleştirilmektedir. Aynı şekilde ölçümler ve veriler PC'den takip edilmektedir. ÇAFS'nin analog ve comparator şeklinde iki çıkışı bulunmaktadır. Analog çıkış, sinyal şekillerini kontrol etmek ve sinyal özelliklerini ölçmek için kullanılmaktadır. Comparator çıkışından mantık sinyali alarak sayısal değerleri elde etmek mümkündür. Spektrometrede kullanılan ÇAFS'nin fotoğrafı şekil 3'te gösterilmiştir. Bu çıkışlardan alınan sinyal şekillerinin osiloskop görüntüleri de sırasıyla şekil 4 ve şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 3. Spektrometrede kullanılan ÇAFS'nin fotoğrafı



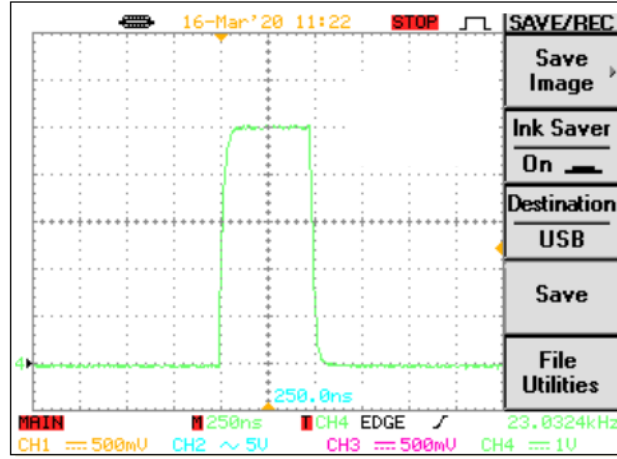
*Şekil 4. ÇAFS'nin analog çıkışının sinyal şekli  
(yatay eksen zaman, dişey eksen voltajı göstermektedir)*



*Şekil 5. ÇAFS'nin comparator çıkışının sinyal şekli  
(yatay eksen zaman, dişey eksen voltajı göstermektedir)*

Ayrıca spektrometrede kullanılan HK modülünün çıkışının sinyal şekli de aşağıda gösterilmiştir.



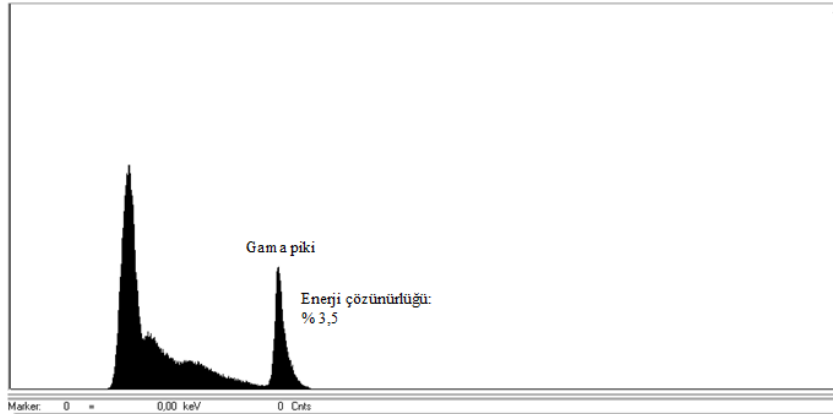


**Şekil 6.** HK çıkışının sinyal şekli

(yatay eksen zaman, düşey eksen voltajı göstermektedir)

### 3. BULGULAR (RESULTS)

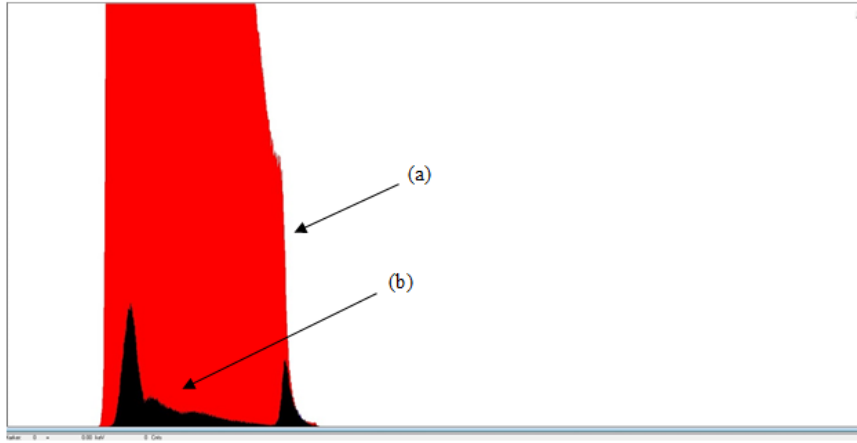
Çalışmada kullanılan spektrometre vasıtasıyla elde edilen kaynak spektrumu şekil 7’de gösterilmiştir. Bu spektrumdaki gama pikinin enerji çözünürlük değeri % 3,5 olarak hesaplanmıştır.



**Şekil 7.** Çalışmada elde edilen kaynak spektrumu

Şekil 1’de verilen doğrudan kaynak ve şekil 7’de verilen deneysel kaynak spektrumlarının karşılaştırması ise şekil 8’de gösterilmiştir. Buradan, bu çalışmada ele alınan deneysel yöntemin gürültüyü önemli miktarda kestiği ve gürültü içinde kalan kaynak spektrumunun ortaya çıkmasında başarılı olduğu görülmektedir.

Yukarıda da belirtildiği gibi ÇAFS’nın ‘comparator’ çıkışı mantık sinyali vermektedir. Hızlı koinsidens modülü de yükselticinin çıkışları arasında koinsidens mantık sinyali üretir. Bu sinyalin çok kanallı analizörün ‘gate’ girişine bağlanması sonucunda ÇAFS’nın ürettiği mantık sinyalleri tetiklenmek suretiyle sistem gürültüsünün elektronik olarak dışlanıp, çok kanallı analizörde sadece dedektörden gelen sinyallerin kaydedilmesi mümkün olmuştur.



**Şekil 8.** a) Şekil 1’de verilen doğrudan kaynak spektrumu (kırmızı), b) Şekil 7’de verilen ve çalışmada elde edilen kaynak spektrumu (siyah)

#### 4. TARTIŞMA VE SONUÇ (DISCUSSION AND CONCLUSION)

Yukarıda elde edilen deneysel sonuçlar değerlendirildiğinde; ÇAFS cihazı ile alınan doğrudan kaynak spektrumunun çok yüksek gürültü içerdiği ve bu nedenle ilgili gama pikinin bu gürültü spektrumu içinde kaldığı şekil 8’den rahatlıkla görülmektedir. Dolayısıyla, sistemde çok miktarda elektronik gürültü meydana geldiğinden şekil 3’te gösterilen ÇAFS cihazı bir gama dedeksiyon işlemi için kullanılamamaktadır. Bu bakımdan, bu çalışmada önerilen deneysel düzenek vasıtasıyla bu gürültü bileşenin önemli oranda azaltıldığı söylenebilir. Ayrıca, bulunan gama pikinin oldukça iyi bir çözünürlük değerine (% 3,5) sahip olması da çalışmada önerilen sistemin bu konuda başarılı olduğunu göstermektedir.

Bu çalışmada uygulanan yöntem koinidens yöntem olup, kısaca aynı kaynaktan gelen sinyallerin elektronik olarak birbirleriyle karşılaştırılması prensibine dayanmaktadır. Dolayısıyla bu işlem genel bir işlem olduğundan benzer şekildeki diğer dedektör sinyali alımlarında da uygulanabilecektir. Buradan hareketle, çalışmada önerilen sistemin farklı tip standart gama kaynaklarının ( $\text{Co}^{60}$ ,  $\text{Na}^{22}$ ,  $\text{Co}^{57}$ ,  $\text{Eu}^{152}$ ,  $\text{Ba}^{133}$  gibi) spektrumlarının elde edilebilmesi için de kullanılacağı söylenebilir. Şöyle ki; kozmik ışınlar gibi yüksek enerjili parçacıkların dedektörde ürettiği sinyallerin genlikleri her zaman sistemin ürettiği gürültü sinyallerinden daha büyük olacağından bu durum dedeksiyon için herhangi bir sorun oluşturmayacaktır. Ancak, literatürdeki tüm çalışmalarda özellikle kalibrasyon kaynağı olarak kullanılmakta olan bu kaynakların yayımladığı gama ışınlarının enerjileri genellikle 1 MeV civarı ve altındaki enerjilerdedir. ÇAFS sisteminin ürettiği gürültü sinyallerinin genliklerinin bu kaynaklardan gelen gama parçacıkların dedektörde ürettiği sinyallerin genliklerinden çok daha büyük olmaları sebebiyle bu kaynakların spektrumları ayırt edilememektedirler. Bu da bu dedektörün zayıf bir noktası olarak ortaya çıkmaktadır. Dolayısıyla, burada belirtilen deneysel yöntem ile bu zorluğun aşılması için bir alternatif sunulmuştur.

Yarı iletken malzemelerin ortam sıcaklığına olan hassasiyetleri sebebiyle şekil 7’de verilen spektrumun sıcaklığa bağlı olarak değişme gösterebilmesi mümkündür. Bu durum spektrumdaki sol pik üzerinde kendini gösterecektir. Yüksek sıcaklıklarda gürültü miktarı artacağından, bu pik daha uzun olarak ortaya çıkacaktır. Bu nedenle, alınacak ölçümlerin oda sıcaklığında, hatta mümkünse biraz daha düşük sıcaklıklarda spektrumların alınması, gürültünün azaltılması ve çözünürlüğün artırılması üzerinde etkili olacaktır. Bunun yanı sıra, karanlık bir ortam ışıktan kaynaklanabilecek gürültünün azaltılması açısından her zaman gerekli olacaktır.

Sonuç olarak; yüksek gürültü nedeniyle 1 MeV ve altındaki enerjilere sahip olan gama ışınlarının dedeksiyonu için kullanılmayan ÇAFS cihazının bu çalışmada önerilen yöntem sayesinde spektrumlarının elde edilebilmesinde başarılı olduğu görülmüş ve sistemdeki elektronik gürültünün azaltılarak kaynağın gama pikinin ortaya çıkarılması mümkün olmuştur. Böylelikle, bu cihazın daha verimli bir şekilde kullanılabilmesi imkanı doğmuştur. Buradan hareketle, ÇAFS’nın doğrudan gama

spektrumu elde edilebilmesi için kullanılabilmesi açısından literatüre katkı sağlanacağı söylenebilir. Ancak, elde edilen sonuç iyi olmakla beraber daha da geliştirilmeli ve hali hazırda mevcut olan gürültünün de azaltılması için çalışmaların sürdürülmesi gerekmektedir. Bu nedenle, sonraki çalışmalarımız bu konu üzerinde devam edecek olup, kaynak spektrumunun literatüre daha yakın bir şekilde elde edilmesi için çalışılacaktır. Ayrıca burada ileri sürülen deneysel yöntemin alfa spektrumu için de kullanılıp kullanılmayacağı da test edilecektir.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Hamamatsu Company, 2020 Si APD, MPPC Catalog, [www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/e03\\_handbook\\_si\\_apd\\_mppc.pdf](http://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/e03_handbook_si_apd_mppc.pdf).
- [2] Tsujikawa, T., Funamoto, H., Kataoka, J., Fujita, T., Nishiyama, T., Kurei, Y., Sato, K., Yamamura, K., Nakamura, S. (2014). Performance of the latest MPPCs with reduced dark counts and improved photon detection efficiency. *Nuclear Instruments and Methods A*, 765(2014), 247-251.
- [3] Winter, B., King, S.J., Brouard, M., Vallance, C. (2016). Improved direct detection of low-energy ions using a multipixelphoton counter coupled with a novel scintillator. *International Journal of Mass Spectrometry*, 397-398, 27-31.
- [4] Yamaguchi, S., Sato, E., Oda, Y., Nakamura, R., Oikawa, H., Yabuushi, T., Ariga, H., Ehara S. (2015). Measurement of X-ray spectra using a Lu<sub>2</sub>(SiO<sub>4</sub>)O-multipixel-photon detector with changes in the pixel number. *Applied Radiation and Isotopes*, 103, 25-30.
- [5] Kataoka, J., Kishimoto, A., Fujita, T., Nishiyama, T., Kurei, Y., Tsujikawa, T., Oshima, T., Taya, T., Iwamoto, Y., Ogata, H., Okochi, H., Ohsuka, S., Ikeda, H., Yamamoto, S. (2015). Recent progress of MPPC-based scintillation detectors in high precision X-ray and gamma-ray imaging. *Nuclear Instruments and Methods A*, 784(2015), 248-254.
- [6] Marano, D., Belluso, M., Bonanno, G., Billotta, S., Grillo, A., Garozzo, S., Romeo, G., Catalano, O., La Rosa, G., Sottile, G., Impiombato, D., Giarrusso S. (2014). Electro-optical characterization of MPPC detectors for the ASTRI Cherenkov telescope camera. *Nuclear Instruments and Methods A*, 768(2014), 32-42.
- [7] Biland, A., Bretz, T., Buß, J., Commichau, V., Djambazov, L., Dorner, D., Einecke, S., Eisenacher, D., Freiwald, J., Grimm, O., von Gunten, H., Haller, C., Hempfling, C., Hildebrand, D., Hughes, G., Horisberger, U., Knoetig, M.L., Krahenb, T., Lustermann, W., Lyard, E., Mannheim, K., Meier, K., Mueller, S., Neise, D., Overkemping, A.-K., Paravac, A., Pauss, F., Rhode, W., Roser, U., Stucki, J.-P., Steinbring, T., Temme F., Thaele, J., Vogler, P., Walterd, R., Weitzela., Q. (2014). Calibration and performance of the photon sensor response of FACT — the first G-APD Cherenkov telescope. *Journal of Instrumentation*, 9, P10012.
- [8] Buzhan, P., Dolgoshein, B., Filatov, L., Ilyin, A., Kantzerov, V., Kaplin, V., Karakash, A., Kayumov, F., Klemin, S., Popova, E., Smirnov, S. (2003). Silicon photomultiplier and its possible applications. *Nuclear Instruments and Methods A*, 504 (2003) 48-52.
- [9] Siefert, S., Vinke, R., van Dam, H.T., Lohner, H., Dendooven, P., Beekman, F.J., Schaart, D.R. (2009). Ultra Precise Timing with SiPM-Based TOF PET Scintillation Detectors. *IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record, Nuclear & Plasma Sciences Society*, 2329-2333.
- [10] Bisogni, M.G., Del Guerra, A., Belcari, N. (2019). Medical applications of silicon photomultipliers. *Nuclear Instruments and Methods A*, 926 (2019), 118-128.

- [11] Lamprou, E., Gonzalez, A.J., Sanchez, F., Benlloch, J.M. (2020). Exploring TOF capabilities of PET detector blocks based on large crystals and analog SiPMs. *Physica Medica* 70, 10-18.
- [12] La Rocca, P., Billotta, S., Blancato, A.A., Bonanno, D., Bonanno, G., Fallica, G., Garozzo, S., Lo Presti, D., Marano, D., Pugliatti, C., Riggi, F., Romeo, G., Santagati, G., Valvo, G. (2015). Fabrication, characterization and testing of silicon photomultipliers for the Muon Portal Project. *Nuclear Instruments and Methods A*, 787(2015), 236-239.
- [13] Riggi, F., Blancato, A.A., La Rocca, P., Riggi, S., Santagati, G. (2014). An extensive air shower trigger station for the Muon Portal detector, *Nuclear Instruments and Methods A*, 764 (2014), 142-149.
- [14] Tsoufanidis, N. (1995). *Measurements and Detection Radiation*. Taylor & Francis, USA.
- [15] Knoll, G.F. (2000). *Radiation Detection and Measurements*. John & Sons Inc. New York.
- [16] Leo, W.R. (1994). *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments*. Springer-Verlag, Berlin.
- [17] Roberts, O.J. (2010). *Investigations of Detector Methods for Gamma-Ray Spectroscopy with PARIS*. PhD Thesis, York University.

## Investigation of the Vortex Cooling Method to Machining Method and Cutting Parameters

 Duygu GÜRKAN\*  Saltuk Alper YAŞAR  Gültekin UZUN  İhsan KORKUT 

Gazi University Faculty of Technology, Department of Manufacturing Engineering, 06500, Yenimahalle/ANKARA

### Graphical/Tabular Abstract

#### Article Info:

 Research article  
 Received: 04/05/2020  
 Revision: 24/08/2020  
 Accepted: 02/09/2020

#### Highlights

- Cooling
- Machining
- Review

#### Keywords

 Vortex Tube  
 Cooling Method  
 Machining Operation

In this study, the working principle of vortex tubes and the usage in the machining was reviewed with the help of previous literature studies. The effect of vortex tubes on machining operations was evaluated in separated titles and discussed its advantages and disadvantages.

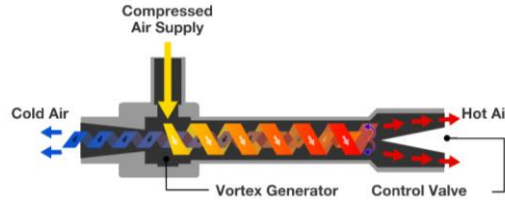


Figure A. Vortex tube

**Purpose:** In this study, the usage of vortex tubes in turning, milling, drilling and grinding operations were investigated in separated titles. The effects of vortex tube usage on tool life, surface roughness and cutting forces were evaluated. Thus, the advantageous areas of the usage of vortex tube were summarized.

**Theory and Methods:** The effects of vortex tubes on manufacturing processes were examined under four different titles. The materials, cutting tools and the cutting parameters of the processes done with vortex tube were stated in detail.

**Results:** The effect of vortex tube usage in cutting performance was evaluated separately for each of four machining operations in Discussion and Finding section.

**Conclusion:** When the previous studies investigated, the literature of the usage of vortex tube was concentrated upon turning and milling operations in general.

In turning operations, it was determined that vortex tube effects positively compared to the dry cutting condition in terms of cutting forces, tool life and cooling performance. However, the surface quality depends onto the material selection.

In milling operations, the surface quality obtained with vortex tube was better than the dry cutting condition. Cooling fluids resulted lower surface roughness values compared to vortex tube.

In drilling operations, vortex tube showed lower performance than conventional cooling method in terms of cutting forces and torque.

In grinding operations, vortex tube showed better performance than conventional cooling method in terms of grinding force, residual stresses and energy consumption.



## Vorteks Soğutma Yönteminin Talaşlı İmalat Yöntemleri Ve Kesme Parametrelerine Göre İncelenmesi

Duygu GÜRKAN\* Saltuk Alper YAŞAR Gültekin UZUN İhsan KORKUT

Gazi University Faculty of Technology, Department of Manufacturing Engineering, 06500, Yenimahalle/ANKARA

### Öz

Vorteks ile soğutma yöntemi son yıllarda araştırma konularında yer almakta ve kullanımı artış göstermektedir. Yapılan çalışmalar ile kesme işlemi üzerindeki etkileri incelenerek, çevre dostu bir soğutma yöntemi olduğu belirtilmektedir. Bu çalışmada vorteks soğutma yönteminin talaşlı imalat yöntemlerine ve kesme performansı üzerine etkileri ayrı başlıklar altında irdelenmiştir. Kesme işlemi üzerindeki performansının diğer soğutma yöntemlerine göre avantajları ve dezavantajları konusunda değerlendirmeler yapılmıştır. Bu değerlendirmeler sonucunda, Vorteks yönteminin kuru işleme, geleneksel sıvı soğutma ve geleneksel hava ile soğutmaya göre tornalama ve frezeleme yöntemlerindeki kesme işlemini olumlu yönde etkilediği gözlemlenmiştir. Kriyojenik ve MQL soğutma yöntemlerine göre ise bu etkinin daha az olduğu görülmüştür.

### Makale Bilgisi

Araştırma makalesi  
Başvuru: 04/05/2020  
Düzeltilme: 24/08/2020  
Kabul: 02/09/2020

### Anahtar Kelimeler

Vorteks Tüpü  
Soğutma Yöntemleri  
Talaşlı İmalat

### Keywords

Vortex Tube  
Cooling Method  
Machining

### Investigation of the Vortex Cooling Method to Machining Method and Cutting Parameters

### Abstract

In recent years, vortex cooling is stated in the research subjects and its usage shows an increase. Researchers examined its effects on cutting process and it is stated in the literature that vortex cooling is an eco-friendly cooling method. In this study, the effect of vortex cooling method on both machining methods and cutting performance was examined in separate titles. Its performance was evaluated in terms of advantages and disadvantages comparing to other cooling methods in cutting process. As a result of this evaluation, vortex cooling effects the cutting process positively in turning and milling processes comparing to dry machining, conventional liquid cooling and conventional air cooling methods. This effect is less comparing to cryogenic and MQL cooling methods.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Talaş kaldırma sırasında harcanan enerjinin büyük bir kısmı ısıya dönüşmektedir [1-3]. Çeşitli imalat operasyonlarında oluşan bu ısının %80'i talaş ile uzaklaştırılırken; %10'u takım, %10'u iş parçası üzerinde kalmaktadır [4-5]. Kesme bölgesinde oluşan ısı; takım ömrü, kesme kuvvetleri, talaş biçimi ve yüzey kalitesini olumsuz etkilemektedir [2,6]. Talaşlı imalat esnasında meydana gelen ısının zararlı etkilerini azaltmak, kesici takım ömrünü uzatmak ve verimi yükseltmek amacıyla soğutma sıvıları kullanılmaktadır. Talaşlı imalat sektöründe kullanılan soğutucu sıvılar; madeni yağ, sabun, sentetik deterjan, aktif ya da nötr katı dolgu maddesi ve kimyasal katkı maddeleri içermektedir. Başarılı bir üretim süreci sadece ürün kalitesine ve üretim süresine bağlı değildir; çevre ve insan sağlığı da dikkate alınmalıdır [7]. Soğutucu sıvıların içerdikleri katkı maddeleri çalışana ve çevreye büyük ölçüde zarar vermektedir. Soğutucu sıvılardan kalan atıkların yok edilmesi de oldukça uzun zaman ve maliyet gerektirmektedir [8]. Kuru işlemede ise oluşan ısıdan dolayı kesici takım ömrü olumsuz etkilenmektedir. Bu nedenle daha az kimyasal içeren farklı alternatif soğutucular için araştırmalar devam etmektedir.

Talaşlı imalat işlemlerinde bor yağı, hava, MQL (Minimum miktarda yağlama) ve kriyojenik, soğutma işlemi için kullanılan yöntemlerdir. Son yıllarda yapılan çalışmalarda, hava ile soğutma yöntemi içinde yer alan Vorteks tüpü ile soğutma işlemi de çevre dostu ve kolay uygulanabilirliği açısından öne çıkmaktadır.

Modern takım uçları, kesici kenarlarını daha yüksek sıcaklıklarda koruyabilmektedir, ancak takım malzemelerindeki bu iyileştirmelerle bile, çeşitli imalat operasyonlarında kesici takımlar aşınmaya devam etmektedir. Bu modern uçların takım ara yüzüne soğuk hava uygulanmasının, kesme maliyetini düşürerek takım ömrünü uzatmaya yardımcı olacağı düşünülmektedir [9] Bu kapsamda pek çok araştırmacı Vorteks yönteminin avantajlarını ortaya koymak için çalışmalar yapmaktadır.

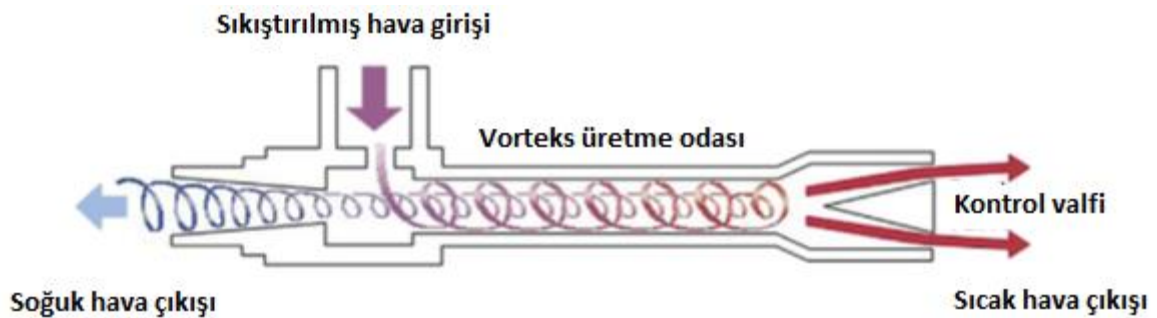
Vorteks tüpleri, 1931 yılında metalurjist ve fizikçi olan George Joseph Ranque tarafından bulunmuş ve Rudolph Hilsch tarafından geliştirilmiştir [10]. Vorteks tüplerinin küçük, hafif ve basit geometriye sahip oluşu imalat ve bakımını kolaylaştırmıştır. Bu özellikleri nedeni ile kurulumu ve kullanımı diğer soğutma yöntemlerine göre daha rahattır. Vorteks tüplerinin hareketli elemanları olmadığından, aşınma ve erozyon minimum düzeyde gerçekleşmekte bu nedenle uzun bir süre sorunsuz çalışabilmektedir. Fanlar, ısı değiştiriciler, soğutkan, sızıntı oluşturabilen borular veya tesisat malzemeleri gerektirmemekte ve tekrar çözünme işlemine gereksinim duymamaktadırlar. Vorteks tüplerinin başlıca avantajları; ekstra elektriksel ya da kimyasal güç gerektirmemesi, ilk yatırım maliyetlerinin düşük olması ve ekolojik açıdan zararsız olması şeklinde belirtilmektedir. Veriminin diğer soğutuculara göre düşük olması ise vorteks tüpünün dezavantajıdır [11].

Ranque-Hilsch Vorteks tüpü olarak da bilinen hava soğutucu sistem, temiz ve soğuk hava akımı sağlamaktadır [12]. Çalışmalarda, vorteks tüpünün diğer soğutma sistemlerinden daha temiz bir ortamda soğutma gerçekleştirmeyi sağladığı ve aynı zamanda kesme işleminde ortaya çıkan ısıyı azaltması sonucu kuru işleme ve geleneksel sıvı soğutma yöntemine göre kesme performansını arttırdığı vurgulanmaktadır.

Bu çalışmada, Vorteks tüpünün tornalama, frezeleme, delme ve taşlama operasyonlarında kullanımı ile ilgili yapılan çalışmalar başlıklar halinde toplanmış, vorteks tüpünün bu alanlarda kullanımının avantaj ve dezavantajları değerlendirilmiştir.

## 2. VORTEKS TÜPLERİNİN ÇALIŞMA PRENSİBİ (WORKING PRINCIPLE OF VORTEX TUBES)

Vorteks tüpleri; yüksek basınçlı havanın teğetsel olarak girdiği, sıcak ve soğuk olmak üzere iki düşük basınçlı sıcaklık akışına ayrılan bir ana tüpten oluşmaktadır. Bu iki hava akışının hacmi ve sıcaklığı sıcak hava egzozuna yerleştirilmiş bir valf ile ayarlanabilmektedir. Vorteks tüpleri ile  $-46^{\circ}\text{C}$  ve  $127^{\circ}\text{C}$  sıcaklıkları arasında hava üretimi mümkün olmaktadır. Şekil 1'de vorteks tüpünün çalışma prensibi gösterilmiştir.



Şekil 1. Vorteks tüpünün çalışma prensibi [13]

Basınçlı hava Şekil 1'de gösterilen sıkıştırılmış hava girişi bölümünden vorteks tüpüne girmekte ve boru içindeki nozullardan geçmektedir. Bu nozullar havanın basıncını azaltıp hızını arttırmak dolayısıyla vorteks oluşturmak için kullanılmaktadır. Vorteks tüpünün şeklinin silindirik olmasının etkisiyle tüp içerisindeki havanın açılma hızı yüksektir. Çok yüksek açılma hızlarında dönen hava, merkezkaç kuvvetinin etkisiyle tüp cidarında ve tüp merkezinde farklı basınç oluşturmakta ve hava basınç farkı nedeniyle radyal yönde

merkeze doğru genişlemektedir. Merkeze gelen havanın açılma hızı, açılma momentumunun korunumu ilkesi gereğince tüp yüzeyindeki havanın açılma hızından daha yüksek değerlere ulaşmaktadır. Bu sebepten dolayı tüp içerisinde iki farklı hızda dönen iki hava akışı oluşmaktadır. Merkezdeki hava, daha yüksek hıza sahip olduğu için yüzeydeki akışı ivmelendirmeye çalışmakta ve bu durumda merkezdeki hava akışı yüzeydeki akışa mekanik enerji transferi gerçekleştirmektedir. Mekanik enerjisinde azalma olan merkezdeki akış, soğuk havaya; tüp cidarındaki sürtünme etkisi ve merkezdeki havadan aldığı mekanik enerjiden dolayı tüp yüzeyindeki akış, sıcak havaya dönüşmektedir. Isınan hava sıcak hava çıkışına doğru hareket etmektedir. Vorteks tüpünün sıcak hava çıkışında bulunan kontrol valfi, havanın tüpün cidarında kalan sıcak bölümünün dışarı atılmasını sağlamaktadır. Tüp içerisinde kalan hava ise, çapı daha küçük olan iç vortekse geri dönmeye ve merkez deliğinden geçmeye zorlanmaktadır. İç vorteks etkisiyle soğuyan hava, soğuk hava çıkışından dışarı atılmaktadır. Bu sayede tüpün bir ucundan sıcak hava diğer ucundan ise soğuk hava elde edilmektedir [14-15].

Vorteks tüpleri genellikle; termal testler, nem alma, gaz sıvılaştırma, buz üretimi ve karışım ayrımı gibi işlemlerde yaygın olarak kullanılırken, işleme proseslerinde soğutma ve ısıtma da sağlamaktadır [16-17].

Daha önce yapılan derleme çalışmaları incelendiğinde genel olarak soğutma tipleri [18], MQL sistem ve vorteks tüpü ile birlikte kullanımları [19], Ti ve Ni bazlı süper alaşımlarda vorteks tüpü ile birlikte kriyjenik soğutma kullanımı [20] ve vorteks tüpünün bazı imalat prosesleri için kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğü etkisi üzerine [21] çalışmaların yapıldığı görülmüştür. Ancak vorteks tüplerinin imalat proseslerinde ayrı ayrı kesme performansına etkisinin incelendiği bir çalışma bulunmamaktadır.

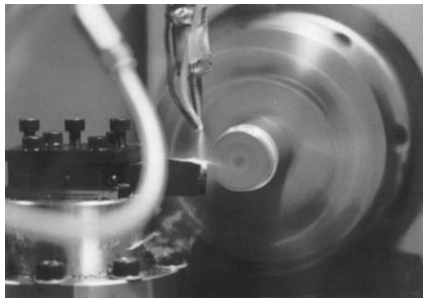
Bu çalışmada, gelecek çalışmalara ışık tutmak amacıyla, farklı malzemelerin çeşitli imalat operasyonlarında vorteks tüpü kullanımının yüzey pürüzlülüğü, takım ömrü, kesme sıcaklığı, kesme kuvvetleri gibi parametrelere etkisi derlenmiştir.

### 3. VORTEKS TÜPLERİNİN İMALAT YÖNTEMLERİNE ETKİSİ (THE EFFECT OF VORTEX TUBES ON THE MANUFACTURING METHOD)

Yapılan çalışmalar incelendiğinde vorteks tüplerinin en çok torna ve freze operasyonlarında kullanıldığı, taşlama ve delme operasyonlarında ise nispeten daha az kullanıma sahip olduğu görülmektedir.

#### 3.1. Tornalama Yöntemine Etkisi (Effect on Turning Method)

Tornalama üzerine yapılan çalışmalar incelendiğinde kesici takım olarak genellikle kaplamalı ve kaplamasız karbür takım tercih edildiği ve az sayıda HSS (Yüksek Hız Çeliği) takımların da kullanıldığı gözlemlenmiştir. Tornalama operasyonu için vorteks tüpü genellikle kuru işleme ve geleneksel soğutma yöntemi ile karşılaştırılmıştır. Şekil 2’de vorteks tüpünün tornalama operasyonunda kullanımı gösterilmiştir.



Şekil 2. Vorteks tüpünün tornalama operasyonunda kullanımı [22]

İş parçaları genellikle çelik ve alaşımları arasından seçilmiştir. Tablo 1’de tornalama operasyonu için kullanılan malzemelerin dağılımı gösterilmiştir.

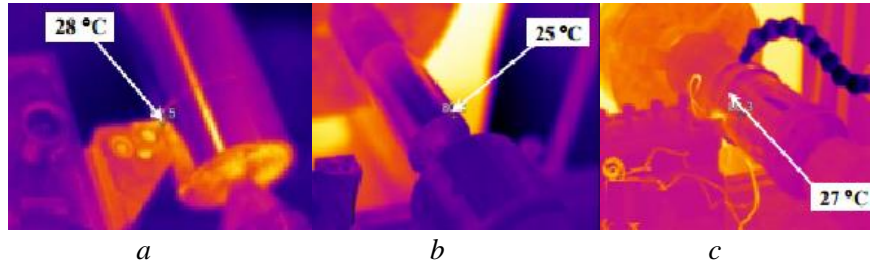


**Tablo 1.** Tornalama operasyonunda kullanılan malzemeler

Kaynak No	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43
Malzeme																						
Çelik ve alaşımları	.			.					.	.	.	.				.		.	.	.		
Al ve alaşımları		.	.						.	.	.											
Ti ve alaşımları					.		.	.						.			.					
Süper alaşımlar															.							
Dökme demir						.																
Paslanmaz çelik																					.	
Diğer														.								.

Çelik ve alaşımlarının tornalama operasyonunda, vorteks tüp kullanımının, kuru kesmeye göre genel olarak kesme sıcaklığını [25,30,32], aşınmayı ve kesme kuvvetlerini azalttığı [22, 25], yüzey kalitesini arttırdığı [22,30] gözlemlenmiştir. Ancak Ekinović ve arkadaşları, ıslah çeliklerinde 60 m/dk kesme hızı, 0.098 mm/dev ilerleme, 0.5 mm kesme derinliği ile kuru kesme ve geleneksel soğutucu kullanımının, vorteks tüpü kullanımına göre kesme kuvvetlerine daha olumlu etki sağladığını belirtmişlerdir [33]. Ayrıca A36 alaşımının 160 m/dk sabit hızla ve değişken ilerleme ve kesme derinliklerinde tornalanmasında vorteks tüpü kullanımının, kuru kesmeye göre kesme sıcaklıklarını azaltırken güç tüketimini ve yüzey pürüzlülüğünü arttırdığını gözlemlenmiştir [41]. Naumov ve arkadaşları, vorteks tüp ile soğutma ve yağlamanın aynı anda yapıldığı sistemlerin, yapı çeliğinde kesme işleminin temel özelliklerinin iyileştirilmesine ve takım ömrüne katkıda bulunduğunu belirtmişlerdir [37]. Araştırmacılar, Al ve alaşımlarının tornalanmasında vorteks tüpünün, soğutma performansı [23-24,32] ve aşınmayı azaltma [23-24] açısından kuru işlemeye ve geleneksel soğutuculara göre daha verimli; kesme kuvveti açısından ise daha az etkin olduğunu vurgulamışlardır [33].

Şekil 3'te sırasıyla ıslah çeliğinin, alüminyum bronzun ve saf alüminyumun tornalanmasında vorteks tüpü kullanımının kesme sıcaklığına etkisi gösterilmiştir.



**Şekil 3.** a) ıslah çeliği b) Alüminyum bronz c) Saf alüminyumun tornalanmasında vorteks tüpünün soğutma etkisi [33]

Ti ve alaşımlarında, vorteks tüp kullanımının, kesme sıcaklığı, takım aşınması [29] ve yüzey pürüzlülüğü [29,38] açısından performansının kuru kesmeye göre daha yüksek olduğunu gözlemlenmiştir. 29 numaralı çalışmada, kesme hızları 80,100,120 m/dk; ilerleme oranları 0.025, 0.05, 0.075 mm/dev; kesme derinlikleri 0.5, 0.75 ve 1 mm olarak belirlenmiştir. 38 numaralı çalışmada ise; 120,150,180 m/dk kesme hızları; 0.11, 0.16, 0.22 mm/dev ilerleme değerleri kullanılmıştır.

Araştırmacılar, MQL ve kriyojenik soğutma ile karşılaştırıldığında, vorteks tüpünün Ti tornalama operasyonunda takım aşınması ve soğutma performansı açısından daha zayıf kaldığını vurgulamışlardır [38]. Bu nedenle; Ti alaşımları üzerine yapılan çalışmalarda yalnızca vorteks tüpü kullanımı yerine kriyojenik soğutma ile vorteks tüpü [26], soğuk su ile sis jeti [28] ya da MQL ile vorteks tüpü [35] gibi sistem kullanımları tercih edilmiş kesme performansı açısından önemli ölçüde fayda sağlanmıştır.

Süper alaşımlar için yapılan çalışmalarda, kriyojenik soğutmanın vorteks tüpü ile soğutmadan daha düşük yüzey pürüzlülüğü ve daha az takım aşınması sağlayacağını belirtmişlerdir [36]. Çelik, Ti ve Al

alaşımlarının yanında vorteks tüpünün dökme demir [27] ve paslanmaz çelik [42] için de kesme sıcaklığını büyük ölçüde azalttığını vurgulamışlardır.

Genel bir değerlendirme yapılacak olursa tornalama operasyonunda vorteks tüpü ile soğutma yönteminin, kuru işleme, geleneksel sıvı soğutma ve geleneksel hava ile soğutmaya göre kesme işlemine pozitif etkide bulunduğu söylenebilir. Kriyojenik ve MQL soğutma yöntemlerine göre ise etkisinin daha az olduğu görülmüştür.

### 3.2. Frezeleme Yöntemine Etkisi (Effect on Milling Method)

Frezeleme operasyonu için yapılan çalışmalar incelendiğinde, vorteks tüpünün genellikle kuru işleme ve geleneksel sıvı soğutucu kullanarak işleme ile karşılaştırıldığı, süper alaşımlar ve bazı malzemeler için MQL ile beraber kullanımın önerildiği [48,61], paslanmaz çeliklerde ise karşılaştırmanın emülsiyon ve sentetik yağ kullanımı ile olduğu görülmektedir [50]. Kesici takım olarak genellikle kaplamalı ve kaplamasız karbür takım kullanılmış, iş parçaları genellikle polimerler ile Al ve alaşımları arasından seçilmiştir. Şekil 4'te frezeleme operasyonunda vorteks kullanımı, Tablo 2'de kullanılan frezeleme operasyonu için literatürde kullanılan iş parçası malzemeleri gösterilmiştir.



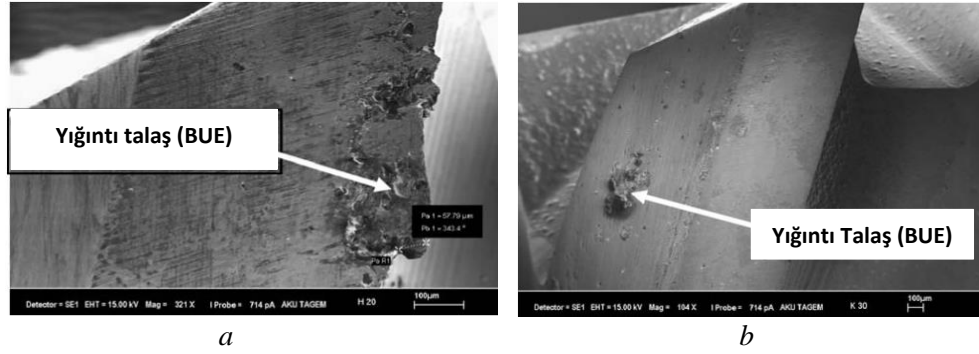
Şekil 4. Vorteks tüpünün frezeleme operasyonunda kullanımı [50]

Tablo 2. Frezeleme operasyonunda kullanılan malzemeler

Kaynak No	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61
Malzeme																		
Çelik		•	•									•						
Al alaşımları	•							•					•				•	
Ti alaşımları						•												
Süper alaşım					•													
Paslanmaz çelik							•											
Polimerler (CFRP,Biyopolimer)									•	•					•		•	
Kompozitler														•				
Diğer (Pirinç, WC)				•														•

Çelik malzemelerin frezeleme operasyonunda vorteks tüpü kullanımının; kesme sıcaklığı [55], takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğü [46] açısından kuru kesmeden daha yüksek; ancak geleneksel soğutucudan daha düşük performansta olduğu belirtilmiştir. Şekil 5'te AISI 1050 çeliğinin; 20m/dk kesme hızı,

0.4 mm/dev ilerleme ve 2.5 kesme derinliği kullanılarak yapılan frezeleme operasyonunda, kuru işleme ve vorteks tüpü ile işlemede yığıntı talaş oluşumlarının karşılaştırması gösterilmiştir.



Şekil 5. a) Kuru işleme ile yığıntı talaş oluşumu b) Vorteks tüpü ile yığıntı talaş oluşumu [46]

Şekil 5 incelendiğinde AISI 1050 çeliğinin frezeleme operasyonunda vorteks tüpü kullanımının kuru işleme göre yığıntı talaş oluşumunu büyük ölçüde azalttığı gözlemlenmiştir.

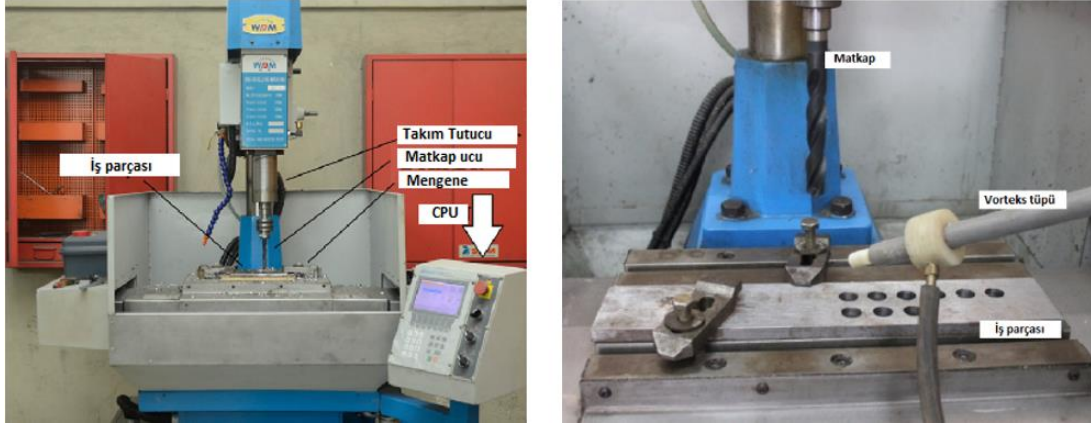
MQL soğutma yöntemi kullanılarak yapılan deneylerin yüzey kalitesinin, vorteks tüple yapılan deneylere göre daha iyi olduğu vurgulanmıştır. Takım aşınması performansını ve yüzey kalitesini iyileştirmek amacıyla frezeleme operasyonunda 175 m/dk kesme hızı, 0.08 mm/diş ilerleme ve 4 mm talaş derinliği kesme parametrelerinde vorteks tüpü ile birlikte MQL soğutma yöntemi de kullanılmıştır [45]. Bu durumun kesme işlemini pozitif yönde etkilediğini belirtmişlerdir. Polimer malzemelerin frezelenmesinde vorteks tüpü kullanımının kuru kesmeye göre kesme sıcaklığını, kesme kuvvetlerini [52], takım aşınmasını [58,60] ve malzemede işleme sonrası meydana gelen çapak yüksekliğini düşürdüğünü [53] gözlemlemişlerdir. 53 numaralı çalışma deneylerinde kullanılan devir 25000 rpm, ilerleme oranı 120 mm/dk, kesme derinliği 0.1 mm'dir.

Al ve alaşımlarının 100,150,250 m/dk kesme hızları ve 1, 2.5 mm kesme derinlikleri kullanılarak frezelenmesinde geleneksel soğutucuların daha düşük yüzey pürüzlülüğü sağladığını ve çapak yüksekliğinin daha az olduğunu vurgulamışlardır [44,56]. Ayrıca yağlama ve soğutmaya eş zamanlı olarak yapan sistemler de geliştirmiş; daha iyi takım performansı ve daha uzun takım ömrü elde etmişlerdir [59]. Polimer, çelik ve alüminyum alaşımlarının yanı sıra pirinç, süper alaşımlar, Ti alaşımları, paslanmaz çelik ve kompozit malzemeler üzerine de çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Pirinci 850 rpm dönme hızı ve 0.5 mm kesme derinliğinde vorteks tüpü ile frezelemenin, kuru frezeleme ve geleneksel soğutucu ile frezelemeye göre kesme sıcaklığı açısından daha iyi sonuç verdiğini gözlemlemişlerdir [47]. Süper alaşımlar işlenirken vorteks tüpü ve MQL'in birlikte kullanıldığı bir sistem ile yapılan frezelemede kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğünün daha düşük değerlerini elde etmişlerdir. Deneylerde 31.4 m/dk kesme hızı; 0.025, 0.050, 0.075 mm/diş ilerleme oranları ve 0.5,0.75,1 mm kesme derinlikleri kullanılmıştır [48]. Ti alaşımları için, vorteks tüpü ile frezelemede kaplamasız takım kullanmanın daha düşük kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü sağlayacağını belirlemişlerdir [49]. Paslanmaz çelik frezelenirken sentetik yağ ya da su bazlı emülsiyon kullanımının yüzey pürüzlülüğü ve kesme kuvvetleri açısından kuru frezeleme ve vorteks tüpü ile frezelemeye göre daha avantajlı olduğunu vurgulamışlardır [50]. Vorteks tüpü ile kompozit bir malzeme frezelenmesinde çapak yüksekliğinin soğutucu ile frezelemeye göre daha fazla olduğunu gözlemlemişlerdir [57].

### 3.3. Delme Yöntemine Etkisi (Effect on Drilling Method)

Delme operasyonlarında deneysel çalışmalar için, genellikle CFRP kompozit malzeme tercih edilmiş, vorteks tüpü geleneksel soğutucu ile karşılaştırılmıştır. Araştırmacılar, delme operasyonu için vorteks tüpü kullanmanın geleneksel soğutucu kullanmaktan daha büyük kesme kuvvetine, torka ve yüzey pürüzlülüğüne yol açtığını, bazı koşullar altında ise, kesme gücü veya tork değerlerinin her iki soğutma tipi için yaklaşık olarak aynı olduğunu saptamışlardır. Ayrıca vorteks tüpü kullanımında, 500 ila 6000 rpm dönme hızı ve 0,1 ila 0,9 mm/s ilerleme hızı aralığında kesme kuvveti ve torkun, ilerleme hızı ile doğru, dönme hızı ve ultrasonik güç ile ters orantılı olarak değiştiğini gözlemlemişlerdir [62-64]. AISI 1040 çeliğinin 500,1000,1500 rpm hızlarında ve 5,10,15 mm/dk ilerleme oranlarında yapılan delme operasyonuna ilişkin bir çalışmada ise vorteks kullanımının standart soğutucu ile delme ve kuru delme

işlemlerine göre daha iyi yüzey kalitesi sağladığını vurgulamışlardır. Şekil 6’da vorteks tüpü ile delme operasyonu gösterilmektedir.

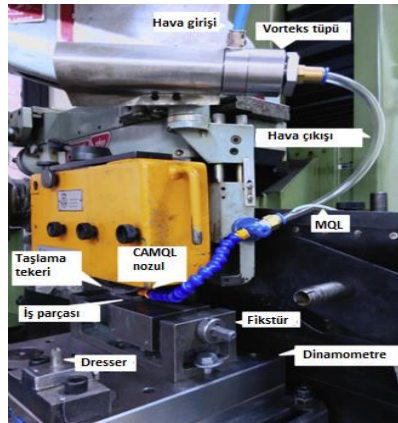


Şekil 6. Vorteks tüpü ile delme operasyonu [65]

### 3.4. Taşlama Yöntemine Etkisi (Effect on Grinding Method)

İncelenen çalışmalarda taşlama operasyonu için vorteks tüp kullanımının kuru taşlama ve geleneksel soğutucu ile taşlamaya göre karşılaştırması yapılmıştır. Bazı çalışmalarda, sentetik yağ ile vorteks tüpü ve MQL ile vorteks tüpü kullanılmıştır. Kesici olarak CBN taş ve iş parçası malzemesi olarak çelik tercih edilmiştir.

Araştırmacılar, yüzey pürüzlülüğü açısından, geleneksel soğutucu kullanımının vorteks tüpü kullanımına göre daha iyi sonuç verdiğini, vorteks tüp ile soğutmada geleneksel soğutucuya göre daha az kalıntı gerilme meydana geldiğini belirtmiştir. Ayrıca vorteks tüpü kullanımının silindirik taşlama operasyonunda daireselliği iyileştirdiğini saptamışlardır [67-68,70]. 67 ve 68 numaralı çalışmalarda iş parçası hızı 18 m/dk; kesme derinlikleri 3,5,10,20,30  $\mu\text{s}$  olarak belirlenmiştir. Vorteks tüpü ile soğutma yönteminin, çeliklerde enerji sarfıyatı açısından kuru işlemeye ve geleneksel soğutucu ile işlemeye göre daha avantajlı olduğu vurgulanmıştır. Tekerlek hızının 23 m/s, tabla hızının 400 mm/dk ve kesme derinliğinin 10,20  $\mu\text{m}$  değerlerinde olduğu deney şartlarında; vorteks tüpü ile ve bitkisel yağın beraber kullanımının geleneksel soğutuculara göre daha az kalıntı gerilmeye neden olduğu tespit edilmiştir [69]. Çeliklerin taşlanması vorteks tüp kullanımının ya da vorteks tüp ile birlikte MQL kullanımının, taşlama kuvvetini kuru taşlamaya göre düşürdüğünü gözlemlenmiştir [70]. Şekil 7’de vorteks tüpü ile birlikte MQL’in kullanıldığı bir sistem görülmektedir.



Şekil 7. Vorteks tüpü ile birlikte MQL kullanımı [70]

#### 4. TARTIŞMA VE BULGULAR (DISCUSSION AND FINDING)

##### 4.1. Tornalama Operasyonu İçin Elde Edilen Sonuçlar (Results for the Turning Operation)

Yapılan literatür çalışmaları incelendiğinde tornalama operasyonu için çalışmaların, vorteksin soğutma performansı, kesme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü, aşınma ve takım ömrüne etkisi üzerine yoğunlaştığı görülmüştür. Özellikle takım ömrü ve kesme sıcaklığı arasında bağıntılar kurularak ideal kesme şartları belirlenmeye çalışılmıştır. Tablo 3'te incelenen çalışmaların yoğunlaştığı konular görülmektedir.

**Tablo 3.** Tornalama operasyonu için yapılan çalışmaların konu dağılımı

Kaynak No	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	
Malzeme																							
Kesme Sıcaklığı		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•										•
Aşınma/Takım ömrü	•	•	•	•			•	•						•	•	•	•	•					•
Kesme Kuvvetleri	•			•	•							•									•		
Yüzey pürüzlülüğü	•						•	•	•	•				•	•		•	•	•	•	•	•	•

Tablo 3 incelendiğinde 23 ile 34 arası numaralandırılan çalışmalarda araştırmacılar, vorteks tüpünün kesme sıcaklığına olan etkisini incelemiş ve vorteks tüpü kullanımının kesme sıcaklığını malzemelere göre %7 ila %66 arasında azalttığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca sıvı ile birlikte vorteks tüpü kullanımı ve kriyojenik soğutma ile birlikte vorteks tüpünün kullanımı ile ilgili çalışmalar da yapmış; soğutma sıvılarına göre sırasıyla %12 ve %22 daha iyi soğutma performansı elde etmişlerdir. 22-25, 28-29 ve 35-39 arası çalışmalarda daha çok aşınma ve takım ömrü için vorteks tüpünün etkisini incelemişlerdir. Vorteks tüpü kullanımının kuru kesmeye göre takım aşınmasını %25-%50 oranında azalttığını ancak soğutucu sıvı ile karşılaştırıldığında beklenen performansı gösteremediğini gözlemlemişlerdir. Vorteks tüpünün, sıvı ile birlikte kullanıldığında, takım aşınması performansını yalnızca soğutucu sıvı kullanımına göre %50 iyileştirdiği görülmüştür.

22, 28-31, 35-36 ve 38-40 numaralı çalışmalarda vorteks tüpünün yüzey kalitesine etkisini incelemiş, vorteks tüpü kullanımının soğutma sıvılarına göre %5-%28 oranında daha iyi yüzey kalitesi sağladığını gözlemlemişlerdir. Ancak kuru işleme ile karşılaştırıldığında, işlenen malzeme ve kullanılan kesici takım önem kazanmaktadır. AISI 1010 için kuru işlemedeki yüzey kalitesi vorteks tüpü kullanarak işlemeye göre %20 daha iyi olurken, Ti-6Al-4V alaşımı TiAlN kaplamalı karbür takım ve vorteks tüpü ile işlendiğinde kuru kesmeye göre %26 oranında avantaj elde etmektedir. 22, 25, 26, 33 ve 41 numaralı çalışmalar vorteks kullanımının kesme kuvvetlerine etkisi üzerinde durmuştur. Araştırmacılar, vorteks tüpü kullanımının kesme kuvvetini kuru işlemeye göre %15 oranında azalttığını belirtmişlerdir. Kuru kesme yerine kriyojenik soğutma ve vorteks tüpü bir arada kullanıldığında esas kesme kuvveti yaklaşık %20 oranında azalmaktadır. Ancak önceden soğutma ve geleneksel soğutma ile karşılaştırıldığında vorteks tüpü daha az etkin kalmıştır.

##### 4.2. Frezeleme Operasyonu İçin Elde Edilen Sonuçlar (Results for the Milling Operation)

Yapılan literatür çalışmaları incelendiğinde frezeleme operasyonu için çalışmaların, vorteksin soğutma performansı, kesme kuvveti, aşınma-takım ömrü, yüzey pürüzlülüğü ve çapak yüksekliğine etkisi üzerine yoğunlaştığı görülmüştür. Tablo 4'te frezeleme operasyonu için incelenen çalışmaların yoğunlaştığı konu dağılımı görülmektedir.

**Tablo 4.** Frezeleme operasyonu için yapılan çalışmaların konu dağılımı

Kaynak No	Çalışma konusu																	
	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61
Kesme Sıcaklığı				•					•	•	•	•						
Aşınma/Takım ömrü		•	•				•							•	•	•	•	•
Kesme Kuvvetleri					•	•	•	•	•									
Yüzey Pürüzlülüğü	•	•	•	•	•	•	•	•										
Çapak Yüksekliği										•			•					

Tablo 4 incelendiğinde frezeleme operasyonu için en çok çalışmanın yüzey pürüzlülüğü üzerine yapıldığı görülmektedir. 44-51 arası çalışmalarda; vorteks tüp kullanımına göre soğutucu sıvı kullanımının yaklaşık %10-%15, MQL kullanımının ise %14 daha düşük yüzey pürüzlülüğü gösterdiğini, yalnızca vorteks tüp kullanımının kuru işlemeye göre %13 daha iyiyken, vorteks tüpü ile birlikte MQL kullanımının kuru işlemeye göre %15 daha iyi yüzey kalitesi sağladığını, paslanmaz çeliklerin vorteks tüpü ile işlenmesinde kaplamasız takım kullanmanın daha avantajlı olacağını gözlemlemişlerdir. 45-46, 57-61 numaralar arası çalışmalarda vorteks tüp kullanımının aşınmaya ve takım ömrüne olan etkisi incelenmiştir. Yan kenar aşınması için vorteks tüp ve MQL kullanımının, sadece MQL kullanımına göre %4, kuru işlemeye göre %16 daha iyi sonuç verdiğini belirtmişlerdir. Vorteks tüp kullanımının kuru kesmeye göre yüksek ilerleme ve kesme hızında takım ömrünü %30-%45 aralığında arttırdığını vurgulamışlardır. Ayrıca MQL ile birlikte vorteks tüp kullanımının takım ömrü açısından daha iyi sonuçlar vereceği düşünülmektedir [51]. 47,52-55 numaralı çalışmalarda vorteks tüpünün genellikle kuru kesmeye göre kesme sıcaklığına olan etkisi ve soğutma performansı araştırılmıştır. Vorteks tüp kullanımının, kullanılan malzemeye göre değişmekle birlikte kuru işlemeden %12-%35, geleneksel soğutucu ile işlemeden ise %5 daha iyi olduğunu gözlemlemişlerdir. 48-52 numaralar arası çalışmalarda vorteks tüp kullanımının kesme kuvvetlerine etkisi üzerinde durulmuştur. Çalışmalarda; vorteks tüpünün kesme kuvvetlerini kuru kesmeye göre %12; vorteks tüp ve MQL'in birlikte kullanımının geleneksel soğutmaya göre %5-8 oranında düşürdüğünü, yalnızca vorteks tüp kullanımının geleneksel soğutmaya ve sentetik yağa karşı daha az başarılı olduğunu belirtmişlerdir. 53 ve 56 numaralı çalışmalarda vorteks tüpünün çapak yüksekliği ile ilişkisi incelenmiştir. Vorteks tüpü kullanımının kuru kesmeye göre %62 daha düşük çapak yüksekliği sağladığı ancak geleneksel soğutucuların vorteks tüp kullanımına göre %84 daha iyi sonuç verdiğini gözlemlemişlerdir.

#### 4.3. Delme Operasyonu için Elde Edilen Sonuçlar (Results for the Drilling Operation)

Literatür çalışmalarına bakıldığında Vorteks tüpünün imalat proseslerine olan etkisi bakımından en az çalışmanın delme operasyonu için yapıldığı gözlemlenmiştir. Delme operasyonu için genellikle CFRP kompozit malzeme tercih edilmiş, kesme kuvveti, tork, yüzey pürüzlülüğü, işlenmiş yüzeylerin yüzey kalitesi ve takım aşınması dikkate alınmıştır. Tablo 5'te delme çalışmalarının yoğunlaştığı konular görülmektedir.

**Tablo 5.** Delme operasyonu için yapılan çalışmaların konu dağılımı

Kaynak No	Çalışma Konusu			
	62	63	64	65
Soğutma Etkisi	•			
Takım Aşınması			•	
Kesme kuvvetleri		•	•	
Yüzey Pürüzlülüğü		•	•	•
Tork		•	•	

Araştırmacılar (62), vorteks tüpü ile delme operasyonunun kuru işlemeye göre soğutma performansı üzerinde durmuş, daha yüksek soğuk hava basıncı ile daha iyi soğutma performansı elde edileceğini belirlemişlerdir. 63 ve 64 numaralı çalışmalarda vorteks tüpü ile delme operasyonunun soğutma sıvısına göre kesme kuvvetlerini %10, torku %15, yüzey pürüzlülüğünü ise %30 arttırdığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca ilerleme hızı azaldıkça, kesme kuvveti ve torkun azaldığını vurgulamışlardır. 65 numaralı çalışmada vorteks tüpü kullanılarak yapılan deneylerde yüzey kalitesinin kuru işleme ile yapılan deneylere göre %22, geleneksel soğutma sıvısı ile yapılan deneylere göre %13 daha iyi olduğunu belirlemişlerdir.

#### 4.4. Taşlama Operasyonu için Elde Edilen Sonuçlar (Results for the Grinding Operation)

Vorteks tüpünün taşlamaya olan etkisi üzerine yapılan makaleler incelendiğinde çalışmaların genellikle kalıntı gerilmeler ve yüzey pürüzlülüğü üzerine yoğunlaştığı gözlemlenmiştir. Tablo 6'da vorteks tüpünün taşlamaya etkisini incelemek için çalışılan konular gösterilmektedir.

**Tablo 6.** Taşlama operasyonu için yapılan çalışmaların konu dağılımı

Kaynak No	66	67	68	69	70
Çalışma Konusu					
Enerji Sarfıyatı				•	
Kalıntı Gerilmeler		•	•		
Yüzey Pürüzlülüğü	•	•	•		
Taşlama Kuvveti	•				•

Araştırmacılar (66) vorteks tüpünün kesme derinliği ve ilerleme esas alındığında kesme kuvvetlerini %17-%24 oranında azalttığını ve yüzey kalitesini iyileştirdiğini gözlemlemişlerdir. 70 numaralı çalışmada MQL ile birlikte vorteks tüpü kullanılarak yapılan düzlem taşlama operasyonunda, taşlama kuvvetinin kuru taşlamaya göre %42, geleneksel soğutucu ile taşlamaya göre %27 düştüğünü gözlemlemişlerdir. 67 ve 68 numaralı makalelerde taşlama operasyonu için vorteks tüpü ile soğutmada geleneksel soğutucuya göre %22-%50 arası daha az kalıntı gerilme meydana geldiğini ancak yüzeyde yağlama yapması nedeniyle soğutma sıvısı kullanmanın, daha iyi yüzey kalitesi sağladığını gözlemlemişlerdir. 69 numaralı çalışmada araştırmacılar vorteks tüpü ile taşlamanın kuru hava ile taşlamaya göre %19 geleneksel soğutucu ile taşlamaya göre %37 daha az enerji sarfıyatı sağladığını gözlemlemişlerdir. Vorteks tüpünden üretilen soğuk hava ile birlikte bitkisel yağ kullanıldığında ise kalıntı gerilmelerin geleneksel soğutucu kullanımına göre %20 daha az olduğu görülmüştür.

#### 4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Yapılan çalışmaların incelenmesi sonucu, vorteks tüpünün kesme performansına etkisiyle ilgili çalışmaların genel olarak tormalama ve frezeleme operasyonları üzerine yoğunlaştığı, delme ve taşlama operasyonları için daha az çalışma yapıldığı gözlemlenmiştir. Genel değerlendirmeler aşağıdaki gibidir.

Vorteks tüpü kullanımının tormalama operasyonu için kuru kesmeye göre genel olarak kesme kuvvetleri, takım ömrü ve soğutma performansını olumlu etkilediği ancak yüzey kalitesinin malzeme seçimine bağlı olarak değiştiği gözlemlenmiştir. Geleneksel soğutma ile karşılaştırıldığında vorteks tüpü daha iyi yüzey kalitesi sağlarken kesme kuvvetleri ve takım aşınması performansı geleneksel soğutmaya göre daha az etkin olmaktadır. Ti ile alaşımları, süper alaşımlar için vorteks tüpünün MQL ve kriyojenik soğutma yöntemleriyle birlikte kullanılması tavsiye edilmektedir.

Frezeleme operasyonlarında vorteks tüpü kullanımı kesme sıcaklığını, kuru işlemeye ve geleneksel soğutuculara göre daha fazla düşürmektedir. Vorteks tüpü kullanarak elde edilen yüzey kalitesi kuru işlemeye göre daha iyi olurken, soğutucu sıvılar, vorteks tüp kullanımına göre daha düşük yüzey pürüzlülüğü sağlamaktadır. Bunun nedeni soğutucu sıvıların soğutma işlemine ek olarak yüzeyde yağlama işlemi yapmasıdır. Bu nedenle frezeleme operasyonlarında çok yüksek yüzey kalitesi istenen yerlerde vorteks tüp kullanımı uygun olmayacaktır. Kesme kuvvetleri esas alındığında vorteks tüpü kullanımı kuru kesmeye göre kesme kuvvetlerini düşürmekte ancak geleneksel soğutucu sıvısı ve sentetik yağa göre daha az etkin kalmaktadır.

Delme operasyonlarında vorteks tüpü kullanımı kesme kuvvetleri ve tork performansı açısından geleneksel soğutmaya göre daha düşük performans göstermiştir. Yüzey kalitesi ise delme operasyonunda kullanılan iş parçası malzemesine göre değişiklik göstermektedir.

Taşlama operasyonlarında vorteks tüpü kullanımı taşlama kuvveti, kalıntı gerilmeler ve enerji tüketimi açısından geleneksel soğutma yöntemine göre daha iyi performans göstermektedir. Ancak geleneksel soğutucular aynı zamanda yüzeyde yağlayıcı görevi de yaptığı için vorteks tüpü ile soğutmaya göre daha iyi yüzey kalitesi sağlamaktadır.

Genel bir değerlendirme yapılacak olursa, tornalama ve frezeleme için çok yüksek yüzey kalitesi beklenmeyen durumlarda vorteks tüpünün kullanımı avantajlı olacaktır. Delme ve taşlama operasyonları için farklı malzemeler üzerine daha çok çalışma yapılması doğru tespit ve karşılaştırma açısından daha faydalı olacaktır.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Çakır, O., Kılıçkap, E., "Metallerin Soğuk Talaşlı İşlenmesi", Makine Tasarım ve İmalat Teknolojileri Kongresi, Konya, 279-283, 2001.
- [2] Çakır, O., M. Kıyak, and Erhan Altan. "Comparison of gases applications to wet and dry cuttings in turning." *Journal of Materials Processing Technology* 153 (2004): 35-41.
- [3] Özçatalbaş, Yusuf, And B. A. Ş. Ali. "Tornalamada Hava Püskürtme İle Soğutmanın Kesme Kuvvetleri Ve Takım Ömrüne Etkilerinin Araştırılması." *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi* 21.3 (2006).
- [4] Yılmaz, Bahattin, Şener Karabulut, and Abdulkadir Güllü. "Performance analysis of new external chip breaker for efficient machining of Inconel 718 and optimization of the cutting parameters." *Journal of Manufacturing Processes* 32 (2018): 553-563.
- [5] Kus, Abdil, et al. "Thermocouple and infrared sensor-based measurement of temperature distribution in metal cutting." *Sensors* 15.1 (2015): 1274-1291.
- [6] Yamane, Yasuo, Norihiko Narutaki, and Katsura Hayashi. "Suppression of tool wear by using an inert gas in face milling." *Journal of materials processing technology* 62.4 (1996): 380-383.
- [7] Çakır, A., et al. "The effect of minimum quantity lubrication under different parameters in the turning of AA7075 and AA2024 aluminium alloys." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 84.9-12 (2016): 2515-2521.
- [8] Nguyen, T., and L. C. Zhang. "An assessment of the applicability of cold air and oil mist in surface grinding." *Journal of Materials Processing Technology* 140.1-3 (2003): 224-230.
- [9] Boswell, Brian, and Tilak Chandratilleke. "Air-cooling used for metal cutting." *American Journal of Applied Science* 6.2 (2009): 251-262.
- [10] Kırmacı, Volkan. "Vorteks Tüpünde Akışkan Olarak Kullanılan Hava, Oksijen, Karbondioksit, Karışım Gazının Soğutma-Isıtma Sıcaklık Performanslarının Deneysel Olarak İncelenmesi." (2007).
- [11] Yılmaz, M., Çomaklı, Ö., Kay, M., Karşlı, S., "Vorteks Tüpler: 1- Teknolojik Gelişim", *Mühendis ve Makine*, 47, 554, s. 42-51, (2006).
- [12] TMMOB Makina Mühendisleri Odası aylık yayın organı, *Mühendis ve Makina* Cilt:51, Sayı:610 (2010).
- [13] Jozić, Sonja, Dražen Bajić, and Luka Celent. "Application of compressed cold air cooling: achieving multiple performance characteristics in end milling process." *Journal of Cleaner Production* 100 (2015): 325-332.



- [14] <https://www.tesisat.org/vorteks-tupu-sogutma-sistemi.html>
- [15] Kırmacı, Volkan; Usta, Hüseyin; MENLİK, Tayfun. Vorteks Tüpünde Akışkan Olarak Hava Oksijen Karbondioksit Azot Ve Argon Kullanılarak Isıtma-Sogutma Sıcaklık Performanslarının Deneysel Olarak Karşılaştırılması. *Sakarya University Journal of Science*, 10.2 (2006): 39-44.
- [16] Salaam, H. A., et al. "Minimum quantity lubrication (MQL) using Ranque–Hilsch vortex tube (RHVT) for sustainable machining." *Applied Mechanics and Materials*. Vol. 217. Trans Tech Publications Ltd, 2012.
- [17] Kırmacı, Volkan. "Exergy analysis and performance of a counter flow Ranque–Hilsch vortex tube having various nozzle numbers at different inlet pressures of oxygen and air." *international journal of refrigeration* 32.7 (2009): 1626-1633.
- [18] Rubio, E. M., et al. "Cooling systems based on cold compressed air: A review of the applications in machining processes." *Procedia engineering* 132.1 (2015): 413-418.
- [19] Boswell, Brian, et al. "A review identifying the effectiveness of minimum quantity lubrication (MQL) during conventional machining." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 92.1-4 (2017): 321-340.
- [20] Elshwain, A. E. I., Norizah Redzuan, and Noordin Mohd Yusof. "Machinability of Nickel and Titanium alloys under of gas-based coolant-lubricants (cls)—A Review." *International Journal of Research in Engineering and Technology* 2.11 (2013): 690-702.
- [21] Cong, Weilong, and Z. J. Pei. "Dry machining using vortex-tube generated cold air as coolant: a literature review." *ASME 2008 International Manufacturing Science and Engineering Conference collocated with the 3rd JSME/ASME International Conference on Materials and Processing*. American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, 2008.
- [22] Ko, Tae Jo, Hee Sool Kim, and Bo Gu Chung. "Air–oil cooling method for turning of hardened material." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 15.7 (1999): 470-477.
- [23] Liu, Jie, and Y. Kevin Chou. "Vortex-tube cooling for tool wear reduction in A390 dry machining." *World Tribology Congress III*. American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, 2005.
- [24] Liu, Jie, and Y. Kevin Chou. "On temperatures and tool wear in machining hypereutectic Al–Si alloys with vortex-tube cooling." *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 47.3-4 (2007): 635-645.
- [25] Hu, Jing Shu, et al. Experimental investigation on air cooling of GCr15. In: *Key Engineering Materials*. Trans Tech Publications Ltd, 2008. p. 197-200.
- [26] Sun, S., M. Brandt, and M. S. Dargusch. "Machining Ti–6Al–4V alloy with cryogenic compressed air cooling." *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 50.11 (2010): 933-942.
- [27] Selek, Murat, et al. "Experimental examination of the cooling performance of Ranque-Hilsch vortex tube on the cutting tool nose point of the turret lathe through infrared thermography method." *International journal of refrigeration* 34.3 (2011): 807-815.

- [28] An, Q. L., Y. C. Fu, and J. H. Xu. "Experimental study on turning of TC9 titanium alloy with cold water mist jet cooling." *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 51.6 (2011): 549-555.
- [29] Liu, Nun-Ming, Ko-Ta Chiang, and Chen-Ming Hung. "Modeling and analyzing the effects of air-cooled turning on the machinability of Ti-6Al-4V titanium alloy using the cold air gun coolant system." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 67.5-8 (2013): 1053-1066.
- [30] Nelge, Balaji, et al. Thermal and Metallographic Investigation for H13A and AISI1050 using Vortex Tube Jet Assisted (VTJA) Machining, 2015.
- [31] Yüksel, S., and A. Y. H. A. N. Onat. "Investigation of CNC Turning Parameters by Using a Vortex Tube Cooling System." *Acta Physica Polonica A* 127.4 (2015): 881-885.
- [32] Balki, Nilesh; Nelge, Balaji; Ingle Asha. Experimental Investigation of Environment Friendly Cooling Methods for Different Machining Conditions. *International Journal of Engineering Sciences&Research Technology*, 6.11 (2017): 186-191.
- [33] Ekinović, Sabahudin, et al. "Cold Air Dry Machining, Part 1: Experimental Setup." *Journal of Trends in the Development of Machinery and Associated Technology* 18.1 (2014): 39-42.
- [34] Boswell, Brian, and Tilak Chandratilleke. "Air-cooling used for metal cutting." *American Journal of Applied Science* 6.2 (2009): 251-262.
- [35] Singh, GurRaj, and Vishal S. Sharma. "Analyzing machining parameters for commercially pure titanium (Grade 2), cooled using minimum quantity lubrication assisted by a Ranque-Hilsch vortex tube." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 88.9-12 (2017): 2921-2928.
- [36] Fernandez, David, et al. "Comparison of machining Inconel 718 with conventional and sustainable coolant." *MM Science Journal* 514 (2014): 506-510.
- [37] Naumov, Alexander, et al. "System of High-performance Cutting with Enhanced Combined Effect of Cooling and Lubrication Medium Based on Ranque-hilsch Effect." *Procedia CIRP* 57 (2016): 457-460.
- [38] Boswell, Brian, and Mohammad Nazrul Islam. "Sustainable cooling method for machining titanium alloy." *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 114. No. 1. IOP Publishing, 2016.
- [39] Sanchez, Luiz EA; Scalon, Vicente L.; Abreu, Guilherme GC. Cleaner machining through a toolholder with internal cooling. In: *3rd International Workshop Advances in cleaner production. Brazil*. 2011.
- [40] Onat, A., S. Yüksel, and S. Hartomacıoğlu. "OPTIMIZATION OF CUTTING PARAMETERS OF TURNING OPERATION WITH VORTEX TUBE COOLING SYSTEM USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORK METHOD." *Machines. Technologies. Materials*. 11.9 (2017): 439-442.
- [41] Taha, Zahari, et al. "Vortex tube air cooling: The effect on surface roughness and power consumption in dry turning." *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering* 8 (2013): 1477.
- [42] Kostadin, Tihana, Goran Cukor, and S. Jakovljevic. "Analysis of corrosion resistance when turning martensitic stainless steel X20Cr13 under chilled air-cooling." *Advances in Production Engineering & Management* 12.2 (2017): 105.

- [43] Gupta, Upendra Sharan, et al. A Proposed Method For Cooling Of Conventional Machines By Vortex Tube Refrigeration. 2017
- [44] Pinar, Ahmet Murat, Serhat Filiz, and Bekir Sadık Ünlü. "A comparison of cooling methods in the pocket milling of AA5083-H36 alloy via Taguchi method." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 83.9-12 (2016): 1431-1440.
- [45] Su, Y., et al. "Refrigerated cooling air cutting of difficult-to-cut materials." *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 47.6 (2007): 927-933.
- [46] Yalçın, B., A. E. Özgür, and M. Koru. "The effects of various cooling strategies on surface roughness and tool wear during soft materials milling." *Materials & Design* 30.3 (2009): 896-899.
- [47] Alsayyed, Basel, Mohammad O. Hamdan, and Saud Aldajah. "Vortex Tube Impact on Cooling Milling Machining." *ASME 2012 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, 2012.
- [48] Yuan, Song Mei, et al. "Investigation of Machinability in Minimum Quantity Lubrication Milling of GH4169 Aerospace Superalloy." *Applied Mechanics and Materials*. Vol. 34. Trans Tech Publications Ltd, 2010.
- [49] Safari, H., et al. "Cutting force and surface roughness characterization in cryogenic high-speed end milling of Ti-6Al-4V ELI." *Materials and Manufacturing Processes* 29.3 (2014): 350-356.
- [50] Chockalingam, P., and Lee Hong Wee. "Surface roughness and tool wear study on milling of AISI 304 stainless steel using different cooling conditions." *International Journal of Engineering and Technology* 2.8 (2012): 1386-1391.
- [51] Boswell, Brian, and Mohammad Nazrul Islam. "The challenge of adopting minimal quantities of lubrication for end milling aluminium." *IAENG Transactions on Engineering Technologies*. Springer, Dordrecht, 2013. 713-724.
- [52] Ha, Seok Jae, et al. "Influence of cutting temperature on carbon fiber-reinforced plastic composites in high-speed machining." *Journal of Mechanical Science and Technology* 31.4 (2017): 1861-1867.
- [53] Miranda-Giraldo, Michael, et al. "Burr formation and control for polymers micro-milling: A case study with vortex tube cooling." *Dyna* 84.203 (2017): 150-159.
- [54] Perri, Gian Marco, et al. "Numerical modelling and analysis of the influence of an air cooling system on a milling machine in virtual environment." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 86.5-8 (2016): 1853-1864.
- [55] Brandão, Lincoln Cardoso, Reginaldo Teixeira Coelho, and Alessandro Roger Rodrigues. "Experimental and theoretical study of workpiece temperature when end milling hardened steels using (TiAl) N-coated and PcBN-tipped tools." *Journal of materials processing Technology* 199.1-3 (2008): 234-244.
- [56] Pınar, Ahmet; Filiz, Serhat. AA5083-H36 Malzemesinin Farklı Soğutma Ortamlarında Frezelenmesinde Çapak Oluşumunun İncelenmesi. *Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 12.2, 2006.

- [57] Gisip, Judith, Rado Gazo, and Harold A. Stewart. "Effects of cryogenic treatment and refrigerated air on tool wear when machining medium density fiberboard." *Journal of Materials Processing Technology* 209.11 (2009): 5117-5122.
- [58] Khairusshima, MK Nor, and I. S. S. Sharifah. "Study on tool wear during milling CFRP under dry and chilled air machining." *Procedia engineering* 184 (2017): 506-517.
- [59] Nevala, Shawn E., et al. "Relative Effects of Cooling and Lubrication in Micro-milling of Aluminum and the Design of Atomization cooling and Lubrication systems." *ASME 2012 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, 2012.
- [60] Khairusshima, MK Nor, et al. "Effect of chilled air on tool wear and workpiece quality during milling of carbon fibre-reinforced plastic." *Wear* 302.1-2 (2013): 1113-1123.
- [61] Balmer, R. T. "Pressure-driven Ranque-Hilsch temperature separation in liquids." (1988): 161-164.
- [62] Cong, W. L., et al. "Rotary ultrasonic machining of CFRP using cold air as coolant: feasible regions." *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 30.10 (2011): 899-906.
- [63] Cong, W. L., et al. "Dry machining of carbon fiber reinforced plastic composite by rotary ultrasonic machining: effects of machining variables." *ASME 2011 International Manufacturing Science and Engineering Conference*. American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, 2011.
- [64] Cong, W. L., et al. "Rotary ultrasonic machining of carbon fiber-reinforced plastic composites: using cutting fluid vs. cold air as coolant." *Journal of Composite Materials* 46.14 (2012): 1745-1753.
- [65] Patwari, Anayet U., et al. "Thermal investigation of vortex generated green coolant on surface texture for drilling process." *Procedia Engineering* 105 (2015): 808-813.
- [66] Lee, Pil-Ho, and Sang Won Lee. "Experimental characterization of micro-grinding process using compressed chilly air." *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 51.3 (2011): 201-209.
- [67] Choi, H. Z., S. W. Lee, and H. D. Jeong. "A comparison of the cooling effects of compressed cold air and coolant for cylindrical grinding with a CBN wheel." *Journal of Materials Processing Technology* 111.1-3 (2001): 265-268.
- [68] Choi, Hon Zong, Suk Woo Lee, and Hae Do Jeong. "The cooling effects of compressed cold air in cylindrical grinding with alumina and CBN wheels." *Journal of Materials Processing Technology* 127.2 (2002): 155-158.
- [69] Nguyen, Thai; Zhang, Liang Chi. A note on two cooling methods in surface grinding. In: *Advanced Materials Research*. Trans Tech Publications Ltd (2011). p. 5-8.
- [70] Saberi, A., et al. "Improvement of surface grinding process performance of CK45 soft steel by Minimum Quantity Lubrication (MQL) technique using compressed cold air jet from vortex tube." *Journal of cleaner production* 131 (2016): 728-738.

## A Resource Survey on the Use of Waste Foundry Sand by Substituting Natural Aggregate in Industrial Waste Based Geopolymer Concrete

Şevki EREN 

Kırşehir Ahi Evran University, Vocational School, Department of Construction Technology, 40200, Merkez/KIRŞEHİR

### Graphical/Tabular Abstract

#### Article Info:

Research article

Received: 11/07/2020

Revision: 09/09/2020

Accepted: 10/09/2020

#### Highlights

- Substitution.
- Waste Foundry Sands.
- Industrial Waste Based GPC.

#### Keywords

Waste Foundry Sand  
 Geopolymer Concrete  
 Industrial Wastes  
 Substitution  
 Alkaline Activators

In this study, the effects of the use of waste foundry sands (WFS), which is an industrial waste type, by substituting natural fine aggregates in geopolymer concrete (GPC) were investigated

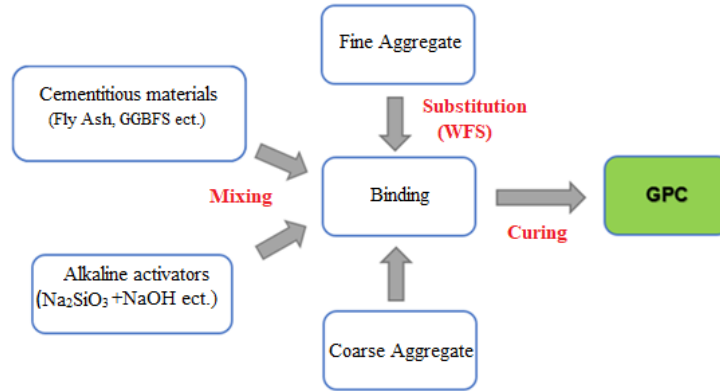


Figure A. Formation scheme of geopolymer concrete

**Purpose:** The main purpose of this study is to examine the literature studies on the basis of recycling and recovery process by reusing solid waste by-products such as WFS, fly ash, ground granulated blast furnace slag (GGBFS) in the GPC.

**Theory and Methods:** In this study, the effects of the use of waste foundry sands (WFS), which is an industrial waste type, by substituting natural fine aggregates in geopolymer concrete (GPC) were investigated

**Results:** As a result of the investigations, it has been determined that there are a limited number of studies in the literature on the use of WFS as a substitute for natural sand in various industrial waste-based GPCs. In these studies, it was revealed that the focus was mostly on mechanical properties and the compressive strength among mechanical properties was examined more. In addition, it was observed that different WFS optimum substitution rates were determined in determining the compressive strength of WFS substituted GPCs. It has been determined that WFS substitution decreases the overall cost, workability, water absorption, and sorptivity of GPC produced with various industrial wastes. It is reported that GPC produced with the addition of WFS has better resistance against acid and sulfate attack compared to conventional concrete.

**Conclusion:** It is thought that a comprehensive investigation of features such as physical (freeze-thaw, thermal conductivity, TGA etc.), chemical (FT-IR etc.), mechanical (impact, hardness etc.), durability, microstructure and radiological, etc. of GPCs substituted with different ratios of WFS with interdisciplinary studies on subjects that have not been adequately researched in the literature will contribute to the literature in many ways. By taking advantage of the knowledge and experience obtained from the studies, it is thought that a great gain will be achieved in the direction of expanding the fields usage of WFS substituted industrial waste-based GPC, increasing its strength, reducing cost, providing a potential sustainable resource for GPC production, reducing disposal and disposal costs by evaluating wastes, protecting natural resources and minimizing the negative impact of cement that causes environmental pollution due to CO<sub>2</sub> emission.



## Endüstriyel Atık Bazlı Jeopolimer Betonda Atık Döküm Kumunun Doğal Agregaya Yerine İkame Edilerek Kullanımı Üzerine Bir Kaynak Taraması

Şevki EREN 

Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, İnşaat Teknolojisi Bölümü, 40200, Merkez/KIRŞEHİR

### Öz

Kentleşme ve sanayileşmenin artması, nehir kumu ve çakıllar gibi doğal kaynakların aşırı kullanılmasına yol açmakta, düzenli depolama alanlarında atıkların depolanması ve bertaraf yöntemleri büyük ekonomik yükümlülükler meydana getirmekte ve çevresel kaygıların artmasına sebep olmaktadır. Bu nedenle katı atık yan ürünlerini ve malzemelerini yeniden konumlandırarak yönetmek çekici bir alternatif bertaraf biçimi haline gelmiştir. Bu çalışmada, endüstriyel bir atık türü olan atık döküm kumlarının (WFS) doğal ince agregaya yerine ikame edilerek kullanımının jeopolimer betondaki (GPC) etkileri incelenmiştir. İncelemeler sonucunda, araştırma konusu olan WFS'nin doğal kum yerine ikame edilerek çeşitli endüstriyel atık bazlı GPC'de kullanımına yönelik literatürde sınırlı sayıda çalışma olduğu ve bu çalışmalarda daha çok mekanik özellikler üzerine yoğunlaşıldığı ve en çok basınç dayanımının incelendiği belirlenmiştir. Ayrıca, WFS ikameli GPC'lerin basınç dayanımlarının belirlenmesinde farklı WFS optimum ikame oranlarının belirlendiği görülmüştür. WFS ikamesinin çeşitli endüstriyel atıklarla üretilen GPC'nin yapım genel maliyetini, işlenebilirliğini, su emme ve kılcal geçirimsizliğini düşürdüğü belirlenmiştir. WFS ilavesiyle üretilen GPC'nin geleneksel betona göre asit ve sülfat saldırısına karşı daha iyi direnç gösterdiği bildirilmiştir. Bu alanda literatürde henüz yeterince araştırılmamış konular üzerinde yapılacak disiplinler arası çalışmalarla farklı oranlarda WFS ikameli GPC'lerin fiziksel, kimyasal, mekanik, durabilite, mikro yapı incelemeleri, radyolojik vb. özelliklerin kapsamlı bir şekilde araştırılmasının birçok yönden literatüre katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

### Makale Bilgisi

Araştırma makalesi  
Başvuru: 11/07/2020  
Düzeltilme: 09/09/2020  
Kabul: 10/09/2020

### Anahtar Kelimeler

Atık Döküm Kumu  
Jeopolimer Beton  
Endüstriyel Atıklar  
İkame  
Alkali Aktivatörler

### Keywords

Waste Foundry Sand  
Geopolymer Concrete  
Industrial Wastes  
Substitution  
Alkaline Activators

## A Resource Survey on the Use of Waste Foundry Sand by Substituting Natural Aggregate in Industrial Waste Based Geopolymer Concrete

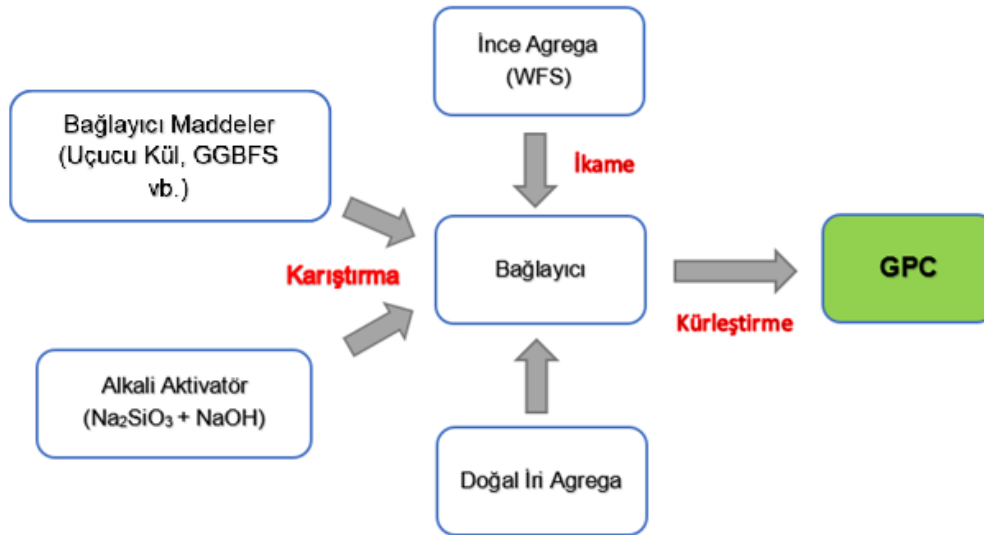
### Abstract

Increasing urbanization and industrialization leads to excessive use of natural resources such as river sand and gravels, storage and disposal methods of wastes in sanitary landfills create great economic obligations and increase environmental concerns. Therefore, managing solid waste by-products and materials by repositioning has become an attractive alternative form of disposal. In this study, the effects of the use of waste foundry sands (WFS), which is an industrial waste type, by substituting natural fine aggregates in geopolymer concrete (GPC) were investigated. As a result of the investigations, it has been determined that there are a limited number of studies in the literature on the use of WFS as a substitute for natural sand in various industrial waste-based GPCs. In these studies, it was revealed that the focus was mostly on mechanical properties and the compressive strength among mechanical properties was examined more. In addition, it was observed that different WFS optimum substitution rates were determined in determining the compressive strength of WFS substituted GPCs. It has been determined that WFS substitution decreases the overall cost, workability, water absorption, and sorptivity of GPC produced with various industrial wastes. It is reported that GPC produced with the addition of WFS has better resistance against acid and sulfate attack compared to conventional concrete. It is thought that a comprehensive investigation of features such as physical, chemical, mechanical, durability, microstructure, radiological, etc. of GPCs substituted with different ratios of WFS with interdisciplinary studies on subjects that have not been adequately researched in the literature will contribute to the literature in many ways.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Endüstriyel yan ürünler ve atık maddelerin artan miktarları, düzenli depolama alanı eksikliği, gittikçe daha büyük çevre sorunları haline gelmektedir [1]. Atıkların bertaraf maliyetlerinin yüksek olması nedeniyle, çoğu atık üreticisi atıklarını çevre mevzuatında tanımlanan süreler içerisinde bertaraf tesislerine göndermek yerine fabrika sahaları içinde biriktirmeyi tercih ettiğinden, yapılan uygunsuz biriktirmeler zamanla su, toprak ve hava kirliliğine neden olmaktadır. Ülkemizde bu tür atıkların geri kazanım süreçleri içinde yeterince değerlendirilmemesi nedeniyle atıklar, atık üreticileri tarafından düzenli depolama tesislerinde bertaraf ettirilmekte ya da alternatif olarak çimento fabrikalarına gönderilmektedir. Atıkların geri dönüşüm ve geri kazanım süreci içinde değerlendirilmeden bertarafı hem ekonomik hem de enerji olarak ciddi kayıplar yaşanmasına neden olmaktadır [2]. Bu nedenle katı atık yan ürünlerini ve malzemelerini yeniden konumlandırarak yönetmek çekici bir alternatif bertaraf biçimi haline gelmiştir [1].

Birçok araştırmacı, bertaraf sorunlarını azaltmak, GPC'nin mekanik özelliklerini iyileştirmek ve GPC'nin maliyetini azaltmak için cam tozu, taban külü, GGBFS, uçucu kül, çelik çürufu, bakır çürufu, silis dumanı, M-Kum, mikro silika, nano silika, WFS vb. endüstriyel atık malzemelerin doğal malzemeler ile ikame edilerek kullanımına yönelik çalışmalar gerçekleştirmişlerdir [3],[4]. Bu çalışmada, GPC üretiminde endüstriyel bir atık türü olan atık döküm kumlarının (WFS) doğal ince agrega yerine ikame edilerek kullanımının çeşitli endüstriyel atık bazlı GPC'deki etkileri incelenmiştir. Çalışmada WFS kullanılmasının sebebi, son birkaç on yılda WFS'nin betonda normal kumun kısmi ve tamamen değiştirilerek eklenmesinin etkisini araştırmak için yapılan çeşitli çalışmalar neticesinde, WFS'nin betondaki doğal kuma alternatif olarak kullanılabilir umut verici bir malzeme özelliği taşıdığı ve betonda kısmi kum ikamesi olarak kullanımının uygun olduğu sonucuna varılmış olmasıdır. Ancak, WFS yüksek miktarda silika içermekte ve alümina ve kalsiyum içermemektedir. Bu nedenle, jeopolimer oluşturmak ve basınç dayanımlarını arttırmak için alümina ve kalsiyum içeren birkaç atık malzemenin eklenmesi gerekmektedir. Jeopolimerler ve alkali aktif bağlayıcılar; uçucu kül ve GGBFS gibi endüstriyel yan ürünleri kullanarak sıradan Portland çimentosunun yerini tamamen alır ve bu da betonu daha az enerji yoğun ve çevre dostu hale getirir [5]. Araştırması yapılan konuda GPC'nin oluşum şeması Şekil 1'de verilmiştir.



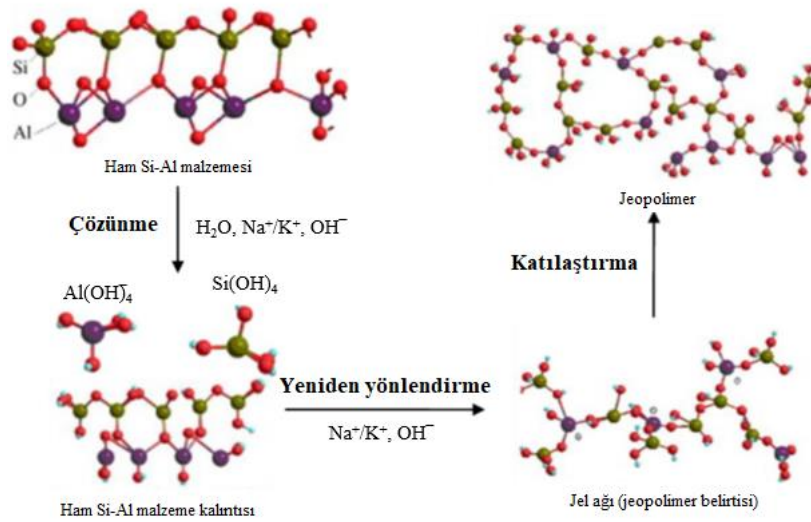
Şekil 1. GPC oluşum şeması.

Çalışmada öncelikle GPC hakkında kısa bir bilgi verildikten sonra atık döküm kumlarının elde edilişi, WFS'nin fiziksel ve kimyasal özellikleri, sektörde açığa çıkan kullanılmış döküm kumu miktarı, WFS'nin yapı sektöründeki uygulamaları tanıtıldıktan sonra WFS'nin GPC'de kullanımı üzerine çeşitli yazarlar tarafından yapılan literatür araştırmaları sunulmuştur.

## 2. JEOPOLİMER BETONLAR (GEOPOLYMER CONCRETES)

Jeopolimer, endüstriyel yan ürünler olan alüminosilikat malzemeler ile alkalın aktivatörleri arasındaki kimyasal reaksiyondan (jeopolimerizasyon) oluşur. Bir başka ifadeyle jeopolimer, kaya oluşturan

minerallerin ideal özelliklerini gösteren amorf bir alümino silikat semantasyon malzemesidir [6],[7]. Yani, kaynak malzemeler ve alkali sıvılar jeopolimerin iki ana bileşenidir. Silikon ve alüminyum açısından zengin doğal mineraller jeopolimerler için kaynak malzemelerdir [6]. Alkalın aktivatörleri genellikle sodyum (NaOH) veya potasyum hidroksit (KOH) ile sıvı sodyum veya kalsiyum silikatın bir karışımıdır [8]. Jeopolimerizasyonda kullanılan en yaygın alkali sıvı ise, sodyum hidroksit ve sodyum silikatın bir kombinasyonudur [6]. Alüminosilikat malzemeler alkalın aktivatörleri ile reaksiyona girdiğinde, sodyum alüminosilikat hidrat jel (NASH) ve kalsiyum silikat hidrat (CSH) jel ürettiğinde jeopolimer ağ oluşumunun iki fazı meydana gelir. Bu iki jel ağı jeopolimer üretiminde farklı işlemlere sahiptir. NASH, üç boyutlu bir yapı oluşturan ortak oksijen atomlarına sahip bir tetrahedral  $SiO_4$  ve  $AlO_4$  ağıdır. CSH, alkali ile aktive edilen malzemelerde ana bağlayıcı fazdır ve bir polimer gibidir. Böylece CSH, jeopolimerlerin basınç dayanımını artırabilir [9]. Bu reaksiyonlardaki 3 ana adım aşağıdaki gibi özetlenebilir (Şekil 2) [6].



Şekil 2. Tipik jeopolimerizasyonun şematik çizimi.

Jeopolimer aktivasyonunda bahsedilebilecek başlıca faktörler toz haline getirilmiş tanelerin spesifik yüzeyi, kür sıcaklığı ve kür süresidir. Aktivasyonda en uygun yöntem kimyasal aktivasyon yöntemidir ve genellikle bu yöntemde aktivatör olarak NaOH veya KOH kullanılır [7].

Davidovits (1988) jeolojik orjinli bir kaynak malzeme içerisindeki veya uçucu kül ve pirinç kabuğu külü gibi yan ürünler içerisindeki silikon (Si) ve alüminyum (Al) ile reaksiyon oluşturarak bağlayıcı üretmek için bir alkalın sıvının kullanılabilmesini önermiştir. GPC'de, kaynak malzemelerde bulunan silika ve alümina önce bir jel oluşturmak için alkalın aktivatörleri tarafından indüklenir. Bu jeopolimer jel, GPC'yi oluşturmak için karışımdaki gevşek agregatları ve diğer reaksiyona girmemiş malzemeleri bağlar. GPC'nin üretimi normal beton teknolojisi yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilir. Jeopolimer ürünleri hava şartlarına karşı iyi bir sürdürülebilirlik sağlar; ancak 400 °C'nin üzerindeki yüksek sıcaklığa dayanıklı değildirler [3],[10]. Önceki test sonuçlarına referansla, GPC'nin; mekanik mukavemet, çevresel koşullara maruz kalma, yangına dayanıklılık vb. özellikleri açısından geleneksel betona göre avantaj sağladığını kanıtlamaktadır [3]. Geleneksel betonunun aksine GPC, CO<sub>2</sub> emisyonlarının azaltılması, atıkların yeniden kullanımı, geri dönüşümü ve doğal kaynakların korunması için önemli bir potansiyele sahiptir [11],[12]. GPC'nin bileşimi son kullanıcıya göre değişebilir ve ince ve kaba agregalar, WFS, düşük kalsiyumlu uçucu kül, öğütülmüş yüksek fırın cürufu (GGBFS) vb. endüstriyel atık malzemelerle birlikte alkalın çözeltisinden oluşabilir [13]. Aktivatör tipi ve alkali konsantrasyonunun rolü, hammaddelerin belirgin dozu, katkıların etkisi, kür sıcaklığının etkisi, mekanik mukavemet, termal mukavemet ve dayanıklılık vb. ile bu iki sistem üzerinde araştırmalar yapılmıştır [3],[13].



### 3. ATIK DÖKÜM KUMLARI (WASTE FOUNDRY SANDS)

Türkiye'nin büyük ilk 500 sanayi kuruluşu içinde yer alan dökümhaneler [14] metal döküm üretimi sonrasında prosenin gereği olarak atık döküm kumlarının sürekli olduğu sektörlerdendir [15]. "Sektörde dökümlerin büyük bir kısmı kum kalıplar kullanılarak yapılmaktadır. Dökümhanelerde kalıp yapımında kullanılan kumun esas görevi, sıvı metal dökülüp katılaşmaya kadar kalıp boşluğunu bozulmadan korumaktır. Dökümün hatasız ve kaliteli olması için döküm kumunun belirli özelliklere sahip olması gerektiğinden her tipte kum bu amaçla kullanılamamaktadır. Kum kalıplar her döküm işleminden sonra açılarak dökülen parça çıkarıldıktan sonra kumdaki büyük parçalar elenmek suretiyle uzaklaştırılmaktadır. Bu süreçte miktarı azalan kum kadar sisteme yeni kum eklenerek tesiste çevrim devam etmektedir. Fakat döküm kumu belli bir çevrimden sonra döküm kalıplarında daha fazla kullanılamayacak hale gelmekte ve kullanılmış WFS kumu olarak dökümhaneden uzaklaştırılmaktadır. Bunun sebepleri; döküm sırasında yaklaşık 1500 °C'deki ergimiş metale maruz kalarak fiziko-kimyasal olarak bozulması, tanelerin birbirine tutunmasını sağlayan doğal malzeme 'bentonit'in bağlayıcılık özelliğini kaybetmesi ve mekanik aşınmayla kum tanelerinin direncinin kırılmasıdır" [16]. Metal döküm sektörüne ait görsel Şekil 3'te gösterilmektedir [17].



Şekil 3. Metal döküm sektöründe ait bir görsel [17].

#### 3.1. WFS'nin Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri (Physical and Chemical Properties of WFS)

WFS hem demir içeren hem de demir içermeyen metal döküm endüstrilerinin üretimine bir yan ürünü olan yüksek kaliteli silika kumudur. Yüksek ısı iletkenliği nedeniyle yüzyıllar boyunca kalıp döküm malzemesi olarak kullanılmaktadır. Çeşitli döküm işlemleri için ham kum kullanılır ve özelliklerini geliştirmek için birkaç bağlayıcı ve katkı maddesi eklenir. Kullanılan bağlayıcı sisteme dayanarak, WFS iki kategoriye ayrılır: Bunlar; kil-bağlı (yeşil) kumlar ve kimyasal olarak bağli kumlardır. İsimlerden de anlaşılacağı üzere, kil bağli kum veya yeşil kum bağlayıcı olarak kilden oluşurken kimyasal olarak bağli kumlarda bağlayıcı olarak kimyasallar kullanılır. Yeşil döküm kumu, döküm yüzeyinin son halini iyileştirmek için genellikle %85-95 silis kumu, bağlayıcı olarak %4-10 bentonit kili, daha sonra %2-10 karbonlu katkı maddesinden oluşur. Aynı zamanda MgO, K<sub>2</sub>O, TiO<sub>2</sub> gibi oksit izleri de içerir. Oysa kimyasal olarak bağli kum veya kimyasal döküm kumu, %93-99 silika kumu ve yaklaşık %1-3 kimyasal bağlayıcıdan oluşur [1]. Silis kumu ve kimyasallar iyice karıştırılır ve daha sonra bir katalizör, kalıp kütlelerini küreletiren ve sertleştiren reaksiyonu başlatır. En yaygın kullanılan kimyasal bağlayıcılar epoksi reçineleri, sodyum silikatlar, furil alkol, fenolik üreanlar vs.'dir. Karbonlu katkı maddelerinin varlığı yeşil döküm kumuna siyah renk verirken, kimyasal döküm kumu açık renktedir. Kalıplama işlemleri için yeşil döküm kumu tercih edilirken, erimiş metalin sıcaklığına dayanması için daha yüksek mukavemet gerektiren çekirdek yapım işlemlerinde ve kalıp yapım işlemlerinde kimyasal döküm kumu kullanılır [18].

WFS'lerin fiziksel özellikleri üzerine yapılan çalışmalarda aşağıdaki bilgiler yer almaktadır. Kaynaklandığı endüstri sektörü, döküm prosesi türü, kalıplama için kullanılan katkı maddeleri türü, kumun geri dönüşüm sayısı ve kullanılan bağlayıcı türü ve miktarına bağlı olarak WFS'lerin fiziksel ve kimyasal özellikleri değişebilmektedir. WFS'lerin silika içeriği normal kumdan daha düşük bulunmuştur [19]. Parçacıklarının yaklaşık %85-90'ı 100 µm'den küçüktür. WFS genel olarak, 0.05-2 mm aralığında belirgin parçacık boyutunda olan kumdan oluşur [20]. Temel olarak ince agrega olduğundan doğal kumun yerine birçok uygulamada kullanılması beklenebilir [21]. Ancak, WFS normal kumun tamamen değiştirilmesi için kullanılmayacak kadar incedir. WFS'nin incelik modülü, normal kumdaki 2.3-3.1'lik incelik modülüne kıyasla 0.9-1.6 aralığında bulunmuştur. WFS'nin parçacık boyutu dağılımına göre, geçişin %50'sine (d50) karşılık gelen boyutun 33 µm civarında olduğu ve döküm kum parçacığının ortalama çapının 28.8 µm olduğu gözlenmiştir [22]. WFS'nin tane büyüklüğü dağılımı çok uniformdur ve malzemenin yaklaşık yüzde 85-95'i 0.6 mm ile 0.15 mm elek boyutları arasındadır. WFS'nin yüzde 5-12'sinin 0.075 mm'den küçük olması beklenebilir [4]. Parçacık şekli tipik olarak yuvarlatılmış açısaldır ve ASTM C33'e göre ince agregalar için derecelendirme gereksinimlerini karşılamamaktadır [23]. Bu nedenle, ince agreganın standart spesifikasyonlarını karşılamak için sadece kaba kumla kısmi değiştirmenin yapılması önerilmektedir [4]. WFS'nin özgül ağırlığının 2.39 ile 2.55 arasında değiştiği bulunmuştur [24]. Bu değişkenlik, farklı numunelerdeki katkı içerikleri ve ince tanelerdeki değişkenliğe bağlanmıştır [4].

### 3.2. Sektörde Açığa Çıkan Kullanılmış Döküm Kum Miktarı (Amount of Used Foundry Sand Exposed in the Sector)

2019 "Aralık ayında açıklanan 53. Dünya Döküm Üretimi istatistiklerine göre, üretim hacmi bakımından, demir ve çelik dökümünde Avrupa'da 2'nci, dünyada 10'uncu; demir dışı metaller dökümünde ise Avrupa'da 3'üncü, dünyada 10'uncu sırada yer almaktadır. Toplam döküm üretiminde ise ülkemiz, Avrupa'nın 3'üncü, dünyanın 11'inci büyük metal döküm üreticisi konumundadır". Türk döküm sektörünün 2019 yılında tam kesinleşmemekle birlikte; toplam üretimi yaklaşık 2.4 milyon tona ulaşmıştır [15]. Döküm sektörü için Çevre ve Şehircilik Bakanlığı'nın yayımladığı Rehber Doküman'da, 1 ton metal döküm üretiminde 0.2-0.5 ton döküm atığı olduğu ve bu atıkların %65 oranında atık döküm kumlarından kaynaklandığı belirtilmiştir [2]. Bu istatistikî verilere göre, 2019 yılında yaklaşık olarak 480.000 ton-1.200.000 ton arasında döküm atığı olduğu ve bu döküm atıklarından yaklaşık olarak 312.000 ton-780.000 ton arasında WFS olduğu ortaya çıkmaktadır. Dökümhanelerde katı atık yönetimi döküm işlemi akış şeması Şekil 4'te verilmiştir [16].



Şekil 4. Dökümhanelerde katı atık yönetimi döküm işlemi akış şeması [16].

### 3.3. WFS'nin Yapı Sektöründeki Uygulamaları (Applications of WFS in Construction Industry)

WFS'nin inşaat mühendisliği çalışmalarındaki potansiyel uygulamaları olarak aşağıdaki örnekler verilebilir. Karayolu toprak set dolgusu, akıcı dolgular, yol yapımında, toprak stabilizasyonu ve

güçlendirmesinde, çimento üretiminde hidrolik bariyer veya astar, harç yapımı, kaldırım blokları, tuğla bloklar, asfalt betonu vb. uygulama alanları olarak sayılabilir. WFS'nin geleneksel malzemelere alternatif olarak çeşitli uygulamalarda kullanılması, geleneksel malzemelerin korunmasında, maliyetin düşürülmesinde ve çevre üzerindeki yükün azaltılmasında, dolayısıyla ülke ve çevreden yararlanmada çok yönlü yardımcı olabileceği düşünülmektedir [18],[25].

### 3.4. WFS'nin Çeşitli Endüstriyel Atık Bazlı GPC'de Kullanımı Üzerine Literatür Araştırması (Literature Research on the Use of WFS in Various Industrial Waste Based GPC)

Bu bölümde, WFS'nin çeşitli endüstriyel atık bazlı GPC'de doğal ince agregaya yerine ikame edilerek kullanımının etkisi üzerine çeşitli yazarlar tarafından sınırlı sayıda yapılan çalışma sonuçları verilmiştir.

Bhardwaj ve Kumar (2017), GPC gibi yeni çağ betonlarında WFS kullanımının kapsamlı bir şekilde incelenmesi gerektiğini belirtmiştir. Ayrıca, çeşitli endüstriyel atık malzemelerin ince agregaya, iri agregaya ve çimento yerine kısmi ikame olarak kullanılmasıyla, GPC yapım genel maliyetinin düşebileceği sonucuna varmışlardır [18].

Morale ve ark. (2017) çalışmalarında, GGBFS ve uçucu külün çimento yerine tamamen değiştirilmesi ve ince kumun WFS ile %10, %20 ve %30 oranlarında ikamesi ile üretilen GPC'nin basınç dayanımındaki değişimi araştırmışlardır. Çalışma sonucunda, betonun 28 günlük basınç mukavemetinin, WFS'nin normal kum ile %20 ikame oranına kadar arttığını ancak bu orandan sonra düşüşe geçtiğini belirlemişlerdir. Sonuç olarak optimum ikame oranını %20 olarak belirlemişlerdir. Bununla birlikte, WFS ile ince agreganın her bir ikame seviyesinde, yaş artışı ile mukavemet artışı gözlemlenmiştir. Ayrıca, WFS ikame oranının artışıyla işlenebilirliğin düştüğünü belirlemişlerdir [26].

Elakyah ve ark. (2019) çalışmalarında uçucu kül ve GGBFS bazlı GPC'de doğal kumun WFS ile %10, %20, %30, %40 ve %50 oranlarında ikamesi ile üretilen GPC'nin mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmada, 8M, 10M ve 12M gibi farklı NaOH molariteleri kullanılmıştır. Basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve yarmada çekme dayanımlarında elde edilen sonuçlara göre optimum ikame oranını %20 olarak belirlemişlerdir. Hem buharıda hem de ortam koşullarında kür edilen GPC için optimum mukavemet sağlayan alkali sıvının molaritesi 12M olarak belirlenmiştir. Fırında kür edilen GPC ortam koşullarında kür edilen GPC'den daha yüksek dayanıma sahip olmuştur [27].

Sashidhar ve ark. (2016) uçucu kül ve GGBFS bazlı kendiliğinden yerleşen GPC'de doğal kumun yerine WFS kullanılarak üretilen GPC'nin mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmalarında dolgu malzemesi olarak F sınıfı uçucu kül / GGBFS oranı (50:50) olacak şekilde kullanılmıştır. NaOH'nin molaritesinin artırılmasıyla artan dayanım ile betonun daha rijit yapıya dönüştüğünü ve doğal kum yerine WFS kullanımının basınç dayanımını arttırdığını ancak yarmada çekme dayanımını azalttığını rapor etmişlerdir. Ayrıca, 60-70 °C kür sıcaklıklarında daha yüksek dayanımların elde edildiğini belirtmişlerdir [28].

Thaarrini ve ark. (2016), GGBFS ve taban külü ile birlikte WFS'nin doğal kum yerine %50 oranında ikamesinin farklı dayanım sınıflarındaki (M30, M35, M40, M50 ve M55) GPC üretiminde uygulanabilirliğini incelemişlerdir. Çalışmada 4M'den 8M'ye kadar düşük konsantrasyonlu NaOH çözeltileri kullanmışlardır. Yoğunluklar, 1800 kg/m<sup>3</sup>, 2000 kg/m<sup>3</sup>, 2200 kg/m<sup>3</sup> ve 2400 kg/m<sup>3</sup> olarak alınmıştır. Taban külü/GGBFS oranı 0, 25, 50, 75 ve 100 olarak belirlenmiştir. Cüruf ilavesinin, jeopolimerizasyon reaksiyonunu arttırdığını ve cüruf miktarı arttıkça, basınç mukavemetinin %50 ikameye kadar arttığını, bu oranın üzerinde azaldığını belirlemişlerdir. WFS'nin normal kum yerine %50 ikame seviyesine kadar eklenmesinin GPC'nin mukavemetini etkilemediğini ancak daha düşük su emme değerlerine sahip olduğunu belirlemişlerdir. Farklı dayanım sınıflarında hazırlanan tüm jeopolimer karışımlarında daha düşük emilim oranları belirlenmiş ve ayrıca beton kalitesindeki artışla emilimin azaldığı bulunmuştur. WFS ilavesi, GPC'nin klorit ve sülfat saldırısına karşı daha iyi direnç gösterdiğini bildirmişlerdir [29].

Namita Patiyal ve ark. (2016) ince agreganın kısmen yerine kullanılan WFS'nin GPC'deki etkinliğini araştırmıştır. WFS ile doğal ince agreganın ikame yüzdeleri ağırlıkça %0, %5, %10, %15, %20 ve %25 olarak hazırlanmıştır. Silika külü-GGBFS esaslı GPC, 80 °C'de fırında kür edilerek erken dayanım kazanmıştır. WFS'nin doğal ince agregaya ile ikamesinde küp numunelerin basınç dayanımlarında optimum oranın %15 olduğu belirlenmiştir. Bu orandaki WFS ikamesi sonucu 7 ve 28 günlük basınç dayanımları

sırasıyla 20.90 N/mm<sup>2</sup> ve 28.33 N/mm<sup>2</sup> olarak elde edilmiştir. Silindir numunelerin eğilme dayanımlarında ise optimum oranın %10 olduğu belirlenmiştir. %10 ikame oranındaki WFS ikamesi sonucu 7 gün ve 28 günlük eğilme dayanımları sırasıyla 5 N/mm<sup>2</sup> ve 5.83 N/mm<sup>2</sup> olarak belirlenmiştir [30].

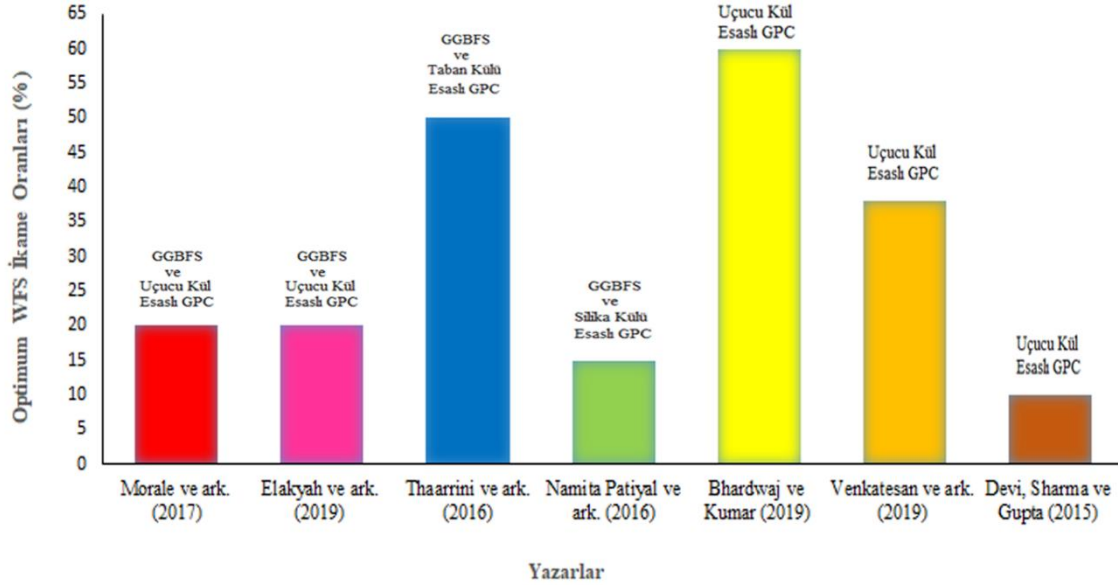
Bhardwaj ve Kumar (2019) çalışmasında, düşük kalsiyumlu uçucu küllü GPC içerisine döküm endüstrilerinden bir yan ürün olan WFS ilavesinin GPC'nin dayanımı (basınç ve yarmada çekme), geçirgenliği ve mikroyapısı üzerindeki etkisini araştırmıştır. Çalışmada, %0, %20, %40, %60, %80 ve %100 oranlarında WFS doğal kum ile ikame edilmiştir. Sertleşmiş GPC'ler üzerinde basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, kapiler su emme, SEM ve EDS analizleri gerçekleştirilmiştir. WFS ilavesinin GPC'nin işlenebilirliğini düşürdüğünü belirlemişlerdir. %60'a kadar WFS ikamesiyle GPC'nin dayanım (basınç, yarmada çekme) değerleri artış gösterirken kılcal geçirimsizliğinin azaldığını belirlemişlerdir. %60 WFS ikamesinde referans betonun (%0 WFS) basınç dayanımından %43 daha fazla dayanım bulunmuştur [31].

Venkatesan ve ark. (2019), GPC sentezlemek için ince agregaların WFS ve uçucu kül proses yan ürünleri ile kısmen ikamesinin etkisini incelemişlerdir. İstenen yüksek basınç dayanımlarını elde etmek için karışım bileşenlerinin (ince agregalar, WFS ve uçucu kül) oranını yönlendirmek için deneylerin D-optimal karışım tasarımını benimsemişlerdir. WFS ve uçucu kül kullanımını maksimuma çıkarmak için optimizasyon yapmışlar ve karışım içerisindeki (ince agregalar + WFS + uçucu kül) ince agregaların sadece ağırlıkça %32 katkısıyla (WFS %38; uçucu kül %30) 7 günlük dayanımda 18.9 N/mm<sup>2</sup> ve 28 günlük dayanımda 22.3 N/mm<sup>2</sup> değerini veren bir tarif belirlemişlerdir [32].

Devi, Sharma, ve Gupta, (2015) çalışmalarında, uçucu kül (başka hiçbir katı madde kullanılmamıştır) ile yüksek oranda NaOH, Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> gibi alkalin çözeltilerinden oluşan ve GPC'nin üzerindeki etkisini görmek için %10, %20 ve %30 oranlarında WFS'yi doğal ince agrega yerine ikame ederek ürettikleri M40 dayanım sınıfındaki GPC'nin farklı kürlenme koşullarındaki (ortam kürü, 60 °C ve 90 °C) 7 ve 28 günlük eğilme dayanımlarını incelemişlerdir. Kür sıcaklığının ve kür süresinin artışıyla dayanımın da arttığını belirlemişlerdir. Tüm kürleştirme şartlarında 28 günlük eğilme dayanımlarda en yüksek dayanımlar %10 WFS ikamesiyle elde edilmiş ve ayrıca ortam sıcaklığındaki kür şartlarında %30 WFS ikame oranına kadar dayanımın artış gösterdiği belirlenmiştir [33].

Apithanyasai, ve ark. (2020) çalışmalarında jeopolimer tuğla üretimi için WFS, uçucu kül ve elektrik ark ocağı cürufunun (EAF cürufu) optimum karışım oranını araştırmışlardır. Çalışmalarında WFS, uçucu kül ve EAF cürufunu 70:30:0, 60:30:10, 50:30:20 ve 40:30:30 oranlarında 8M sodyum hidroksit (NaOH) çözeltilisi ile karıştırmışlardır. Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>/NaOH oranı 2.5 olacak şekilde kullanılmıştır. Karışımlar 5cm x 5cm x 5cm kalıplarda sıkıştırılmış ve 28 gün çevre sıcaklığında kürlenmiş ve basınç dayanımları belirlenmiştir. Çalışma sonucunda, en yüksek basınç dayanımına sahip jeopolimer tuğlaların, 25.76 MPa basınç dayanımı ile %40 WFS'nin kullanıldığı 40:30:30 oranındaki karışımlar olarak belirlenmiştir [34].

Doğan-Sağlamtimur (2018) çalışmasında, dökümhane sektöründe WFS sorununa bir çözüm getirmek ve yeniden kullanılmasını sağlamak için, tamamen WFS atıkları kullanarak jeopolimer yapı malzemesi (çimentosuz bir teknoloji olarak) üretmiş ve bu malzemenin fiziksel ve mekanik özelliklerini belirlemiştir. Deney adımının ilk bölümünde elek analizi, gevşek/sıkı birim ağırlık ve WFS'nin yanma kaybı testleri gerçekleştirmiştir. İkinci aşamada, kimyasal bağlayıcılarla (NaOH ve Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>) aktive edilen WFS bazlı jeopolimer numuneleri üzerinde su emme yüzdesi, porozite, birim ağırlık ve basınç dayanımı testleri gerçekleştirmiştir. Üretilen tüm numunelerin birim ağırlıkları 1.6 g/cm<sup>3</sup> 'ten düşük olmuştur. WFS atıklarını jeopolimer üretiminde hammadde olarak kullanan çalışmada uygulanan yöntemde, WFS içerisine farklı oranlarda (ağırlık/ağırlık bazında) eklenen kimyasal bağlayıcıların optimum miktarları NaOH için %10 (kür sıcaklığı 100 °C) ve Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> için %30 (kür sıcaklığı 200 °C) olarak belirlenmiştir. Duvar yapı malzemeleri için minimum basınç dayanımı değeri ulusal standartlara göre 2.5 MPa olarak kabul edilirken çalışmada, 200 °C'lik kürleme sıcaklığında %30 Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> karışımının dahil edilmesi ile 28 günlük maksimum basınç dayanımı değeri, 12.3 MPa olarak ölçülmüştür. Sonuç olarak jeopolimer malzemenin bir yapı duvarı malzemesi olarak kullanılmaya uygun olduğu sonucuna varmıştır [35]. Çeşitli endüstriyel atıklar kullanılarak üretilen GPC'de farklı yazarlar tarafından bulunan optimum WFS ikame oranları Şekil 5'te gösterilmektedir.



**Şekil 5.** Çeşitli endüstriyel atıklar kullanılarak üretilen GPC'de farklı yazarlar tarafından bulunan optimum WFS ikame oranları.

Şekil 5 incelendiğinde, çeşitli endüstriyel atık bazlı GPC'nin basınç dayanımlarının belirlenmesinde farklı WFS optimum ikame oranlarının belirlendiği görülmüştür. Morale ve ark. (2017) ve Elakyah ve ark. (2019), GGBFS ve uçucu kül bazlı WFS ikameli GPC'de optimum WFS ikame oranını %20, Thaarrini ve ark. (2016), GGBFS ve taban külü bazlı GPC'de %50, Namita Patiyal ve ark. (2016), GGBFS ve silika külü bazlı GPC'de %15 olarak belirlerken, sadece uçucu kül bazlı GPC'de optimum WFS ikame oranlarını Bhardwaj ve Kumar (2019) %60, Venkatesan ve ark. (2019) %40 ve Sharma ve Gupta, (2015) %10 olarak belirlemişlerdir.

#### 4. SONUÇ ve ÖNERİLER (CONCLUSIONS and RECOMMENDATIONS)

Bu araştırmanın esasını teşkil eden; WFS'nin çeşitli endüstriyel atık bazlı GPC'de doğal ince agrega yerine ikame edilerek kullanımının etkisi üzerine sınırlı sayıda çalışmanın yapıldığı ve bu alanda literatürde ciddi oranda bir boşluk olduğu belirlenmiştir. WFS ikameli GPC'de çeşitli endüstriyel atıkların kullanımına yönelik araştırma bulguları aşağıda verilmiştir.

- WFS ikamesinin GPC yapım genel maliyetini düşüreceği sonucuna varılmıştır.
- WFS ikame artışının GPC'nin işlenebilirliğini düşürdüğü rapor edilmiştir.
- WFS'nin normal kum yerine ikamesiyle GPC'nin daha düşük su emme değerlerine ve daha düşük kılcal geçirimsizliğe sahip olduğu tespit edilmiştir.
- Çeşitli endüstriyel atık bazlı GPC'de WFS'nin doğal kum ile ikame edilerek kullanımıyla üretilen GPC'lerin basınç dayanımlarının belirlenmesinde farklı WFS optimum ikame oranlarının belirlendiği görülmüştür. GPC üretiminde kullanılan endüstriyel atıkların türü ve oranları, kullanılan bileşenlerin fiziksel ve kimyasal özellikleri, kür sıcaklığı ve kür süreleri, kullanılan aktivatör türü, alkali konsantrasyonunun rolü ve alkali oranları vb. özelliklerin çeşitliliğinden dolayı farklı WFS optimum ikame oranlarının elde edildiği düşünülmektedir.
- WFS ilavesiyle üretilen GPC'nin geleneksel betona göre asit ve sülfat saldırısına karşı daha iyi direnç gösterdiği bildirilmiştir.

Sonuç olarak, araştırma konusu olan WFS'nin doğal kum yerine ikame edilerek çeşitli endüstriyel atık bazlı GPC'de kullanımına yönelik literatürde sınırlı sayıda çalışma olduğu ve bu çalışmalarda daha çok mekanik özellikler üzerine yoğunlaşıldığı ve en çok basınç dayanımının incelendiği belirlenmiştir. Bu alanda literatürde henüz yeterince araştırılmamış konular üzerinde yapılacak disiplinler arası çalışmalarla farklı

oranlarda WFS ikameli GPC'lerin fiziksel (donma-çözülme, termal iletkenlik, TGA vb.), kimyasal (FT-IR vb.), mekanik (darbe testi, sertlik vb.), durabilite ve mikro yapı incelemeleri, radyolojik vb. özelliklerin kapsamlı bir şekilde araştırılmasının birçok yönden literatüre katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Çalışmalar sonucunda elde edilecek bilgi, birikim ve deneyimlerden yararlanarak WFS ikameli ve endüstriyel atık bazlı GPC'nin kullanım alanlarının genişletilmesi, mukavemetinin artırılması, maliyetin azaltılması, GPC üretimi için potansiyel sürdürülebilir bir kaynak sağlanması, atıkların değerlendirilerek bertarafın ve bertaraf maliyetinin azaltılması, doğal kaynakların korunması ve çimentonun CO<sub>2</sub> salınımı nedeniyle çevre kirliliğine sebep olan olumsuz etkisinin en aza indirilmesi yönünde çok büyük bir kazanç elde edileceği düşünülmektedir.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Siddique R, Singh G. Utilization of waste foundry sand (WFS) in concrete manufacturing. *Resour Conserv Recycl* 2011;55:885–92. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.05.001>.
- [2] Yalılı K.M, Tüylü M. Atık Döküm Kumları İçin Uygun Bertaraf Yönteminin Maliyet Analizi ile Belirlenmesi: Bursa Örneği. *Doğal Afetler ve Çevre Derg* 2019;90:1–10. <https://doi.org/10.21324/dacd.490558>.
- [3] Kumar Patel BB, Kumar Pitroda J. A Review of Geo Polymer Concrete by Using Various Industrial Waste Materials. *Int J Constr Res Civ Eng* 2017;3:121–31. <https://doi.org/10.20431/2454-8693.0304011>.
- [4] Okenyi V. Strength Properties of Concrete Produced With Foundry Sand as Fine Aggregate Replacement 2020. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.29829.91367/1>.
- [5] Davidovits J. Properties of Geopolymer Cements. *First Int Conf Alkaline Cem Concr* 1994:131–49.
- [6] Jian, He. Synthesis and characterization of geopolymers for infrastructural applications ,Louisiana State University LSU Digital Commons 2012.
- [7] Singh B, Ishwarya G, Gupta M, Bhattacharyya SK. Geopolymer concrete: A review of some recent developments. *Constr Build Mater* 2015;85:78–90. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.036>.
- [8] Hadi MNS, Al-Azzawi M, Yu T. Effects of fly ash characteristics and alkaline activator components on compressive strength of fly ash-based geopolymer mortar. *Constr Build Mater* 2018;175:41–54. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.092>.
- [9] Li C, Sun H, Li L. A review: The comparison between alkali-activated slag (Si + Ca) and metakaolin (Si + Al) cements. *Cem Concr Res* 2010;40:1341–9. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.03.020>.
- [10] Yusuf TO, Ismail M, Usman J, Noruzman AH. Impact of Blending on Strength Distribution of Ambient Cured Metakaolin and Palm Oil Fuel Ash Based Geopolymer Mortar. *Adv Civ Eng* 2014;2014. <https://doi.org/10.1155/2014/658067>.
- [11] Ganesan N, Abraham R, Deepa Raj S, Sasi D. Fracture properties of geopolymer concrete. *Asian J Civ Eng* 2015;16:127–34.
- [12] Provis JL. Geopolymers and other alkali activated materials: Why, how, and what? *Mater Struct Constr* 2014;47:11–25. <https://doi.org/10.1617/s11527-013-0211-5>.
- [13] Duxson P, Fernández-Jiménez A, Provis JL, Lukey GC, Palomo A, Van Deventer JSJ. Geopolymer technology: The current state of the art. *J Mater Sci* 2007;42:2917–33. <https://doi.org/10.1007/s10853-006-0637-z>.
- [14] İSO 500 | Türkiye'nin 500 Büyük Sanayi Kuruluşu n.d. <http://www.iso500.org.tr/500-buyuk-sanayi-kurulusu/2018/> (Erişim tarihi: 09.06.2020).

- [15] TÜRKDÖKÜM Dergisi, Sayı 54, 2020, [https://tudoksad.org.tr/upload/files/T%C3%BCrkd%C3%B6k%C3%BCm\\_Sayi\\_54.pdf](https://tudoksad.org.tr/upload/files/T%C3%BCrkd%C3%B6k%C3%BCm_Sayi_54.pdf) (Erişim tarihi: 09.06.2020).
- [16] Dökümhanelerden Kaynaklanan Tehlikeli Katı Atıkların Yönetimi. Eckart Schultes - PDF Free Download n.d. <https://docplayer.biz.tr/2791654-Dokumhanelerden-kaynaklanan-tehlikeli-kati-atiklarin-yonetimi-eckart-schultes.html> (Erişim tarihi: 09.06.2020).
- [17] Türkiye Döküm Sanayicileri Derneği. Türkiye Döküm Sektörü, Kullanılmış Döküm Kumunun Değerlendirilmesi ve Geri Kazanımı, 2019. [http://www.tudoksad.org.tr/upload/files/TUDOKSAD\\_Dokum\\_Kumu\\_Geri\\_Kazanimi\\_Raporu\\_F%20%282%29%20%283%29.pdf](http://www.tudoksad.org.tr/upload/files/TUDOKSAD_Dokum_Kumu_Geri_Kazanimi_Raporu_F%20%282%29%20%283%29.pdf), (Erişim tarihi: 09.06.2020).
- [18] Bhardwaj B, Kumar P. Waste foundry sand in concrete: A review. *Constr Build Mater* 2017;156:661–74. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.010>.
- [19] Naik TR. Foundry Industry By-Products Utilization. University of Wisconsin-Milwaukee, Department of Civil Engineering and Mechanics, Center for By-Products Utilization, Report No. CBU-1989-01, 1989.
- [20] Dayton EA, Whitacre SD, Dungan RS, Basta NT. Characterization of physical and chemical properties of spent foundry sands pertinent to beneficial use in manufactured soils. *Plant Soil* 2010;329:27–33. <https://doi.org/10.1007/s11104-009-0120-0>.
- [21] Ellis JMK and DJ. Mechanical Properties of Concrete Containing Foundry Sand. *Spec Publ* n.d.;200. <https://doi.org/10.14359/10612>.
- [22] Aggarwal Y, Siddique R. Microstructure and properties of concrete using bottom ash and waste foundry sand as partial replacement of fine aggregates. *Constr Build Mater* 2014;54:210–23. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.12.051>.
- [23] Naik TR, Kraus RN, Ramme BW, Canpolat F. Effects of fly ash and foundry sand on performance of architectural precast concrete. *J Mater Civ Eng* 2012;24:851–9. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000432](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000432).
- [24] Javed S, Lovell CW, Wood LE. Waste foundry sand in asphalt concrete. *Transp Res Rec* 1994;27–34.
- [25] Fiore S, Zanetti MC. Foundry wastes reuse and recycling in concrete production. *Am J Environ Sci* 2007;3:135–42. <https://doi.org/10.3844/ajessp.2007.135.142>.
- [26] Morale A, Chaurasiya D, Jaiswal AP. Effective Utilization of Foundry Sand and Ground Granulated Blast Furnace Slag in Geopolymer. *Asian J Convergn Tecnol* 2015;III:1–7.
- [27] Elakyah D, Kalaivani M, Easwaran P. Effect of Curing and Molarity on Geopolymer Concrete With Foundry Sand 2019;7:203–8.
- [28] Sashidhar, C., GURU, J. J., Neelima, C., & PAVAN, K. D. Preliminary Studies on self compacting geopolymer concrete using manufactured sand, 2016.
- [29] Thaarrini J, Ramasamy V. Properties of foundry sand, ground granulated blast furnace slag and bottom ash based geopolymers under ambient conditions. *Period Polytech Civ Eng* 2016;60:159–68. <https://doi.org/10.3311/PPci.8014>.
- [30] Patiyal N, Kumar J, Sharma AK. Experimental Study on Geopolymer Concrete with Partial Replacement of Fine Aggregate with Foundry Sand. vol. 3. 2016.

- [31] Bhardwaj B, Kumar P. Comparative study of geopolymer and alkali activated slag concrete comprising waste foundry sand. *Constr Build Mater* 2019;209:555–65. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.107>.
- [32] Venkatesan M, Zaib Q, Shah IH, Park HS. Optimum utilization of waste foundry sand and fly ash for geopolymer concrete synthesis using D-optimal mixture design of experiments. *Resour Conserv Recycl* 2019;148:114–23. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.05.008>.
- [33] Devi R, Sharma SK, Gupta H. Effect of Different Curing Conditions on Geopolymer Concrete By Partially Replacing Sand With Foundry Sand. *J Today'S Ideas - Tomorrow'S Technol* 2015;3:123–8. <https://doi.org/10.15415/jotitt.2015.32008>.
- [34] Apithanyasai S, Supakata N, Papong S. The potential of industrial waste: using foundry sand with fly ash and electric arc furnace slag for geopolymer brick production. *Heliyon* 2020;6:e03697. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03697>.
- [35] Doğan-Sağlamtimur N. Waste Foundry Sand Usage for Building Material Production: A First Geopolymer Record in Material Reuse. *Adv Civ Eng* 2018;2018. <https://doi.org/10.1155/2018/1927135>.