

F ı r a t   n i v e r s i t e s i
Mühendislik Bilimleri Dergisi (MBD)
Cilt:29, Sayı:2, Yıl: 2017
ISSN: 1308 - 9072

  l e t i Ő i m

Fırat Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
23119, ELAZIĞ

Tel: 0 424 212 27 07
Faks: 0 424 236 99 55
e-posta: fenbilimdergi@firat.edu.tr

Baskı: Fırat Üniversitesi Matbaası

Bu dergi yılda 2 kez ve hakemli olarak yayımlanır.

Derginin Eski adı: Fırat Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi
Derginin Eski ISSN numarası: 1300-2708

<http://web.firat.edu.tr/fenbilimleri/Dergiler/MBD/index.html>

Fırat Üniversitesi
Mühendislik Bilimleri Dergisi (MBD)

Sahibi

Prof Dr. Kutbeddin DEMİRDAĞ
Fırat Üniversitesi Rektörü

Genel Yayın Yönetmeni

Prof. Dr. Soner ÖZGEN
F.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Editör

Doç. Dr. Erkan TANYILDIZI
Fırat Üniversitesi

Editör

Yrd. Doç. Dr. Sencer ÜNAL
Fırat Üniversitesi

DANIŞMA KURULU

Deniz ÜNER	O.D.T.Ü. Kimya Müh.	Cemal GÖNCÜOĞLU	O.D.T.Ü. Jeoloji Müh.
Nurhan ARSLAN	F.Ü. Kimya Müh.	Galip AYDIN	F.Ü. Bilgisayar Müh.
M. Polat SAKA	O.D.T.Ü. Müh. Bil.	Serdar SALMAN	Marmara Ü. Metal
Erhan AKIN	F.Ü. Bil. Müh.	Yusuf CELAYİR	F.Ü. İnşaat Müh.
Z. Hakan AKPOLAT	F.Ü. Mekatronik Müh.	Eres SÖYLEMEZ	O.D.T.Ü. Makine Müh.
Ruşen GEÇİT	O.D.T.Ü. Müh. Bil.	Ülkü YETİŞ	O.D.T.Ü. Çevre Müh.
Umran S. İNAN	Stanford Ü. Elekt-Elktr. Müh.	İlker B. TOPÇU	Osmangazi İnş. Müh.
Cumali KINACI	İ.T.Ü. Çevre Müh.	Bünyamin AKSAKAL	Y.T.Ü. Malz. ve Met. Müh.
Erkan ŞAHİNKAYA	İ.M.Ü. Biyomühendislik	Temel SAVAŞKAN	K.T.Ü. Makine Müh.
Ayşe DALOĞLU	K.T.Ü. İnşaat Müh.	Mehmet CEBECİ	F.Ü. Elekt-Elktr. Müh.
Yetkin TATAR	F.Ü. Bil. Müh.	Fikret ATA	B.Ü. Elekt-Elktr. Müh.

Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi (MBD)
29(2), 2017

İÇİNDEKİLER / CONTENTS	
1. Basit Brayton Çevriminde Elektrik Üretimi Maliyetinin Parametrik Analizi <i>Parametric Analysis of Electricity Production Cost for Simple Brayton Cycle</i> Burhanettin Çetin.....	1-8
2. CuAlCr Şekil Hatırlamalı Alaşıma Yaşlandırma Sıcaklığı ve Yaşlandırma Zamanının Etkileri <i>The Effects of Ageing Temperature and Ageing Time on CuAlCr Shape Memory Alloy</i> Mediha KÖK, Z. Deniz YAKINCI, Yıldırım AYDOĞDU, Ayşe AYDOĞDU.....	9-13
3. LFSR Soru Girdisi İle PUF Tasarımının Gerçeklenmesi <i>Implementation of PUF Design with LFSR Question Input</i> Erdoğan Avaroğlu.....	15-21
4. Linyit Yakılan Bir Güç Üretim İstasyonunun Gaz Türbininin İkinci Kanun Analizi <i>Second Law Analysis of A Gas Turbine of A Lignite-Fired Power Station</i> Erdem IŞIK, Hasan Kaan BERENT, Mehmet GÖK.....	23-30
5. Şeker Pancarı Melası Kullanılarak Gluconacetobacter xylinum NRRL B-759 ile Bakteriyel Selüloz Üretimi Üzerine Etanolün Etkisi <i>Bacterial Cellulose Production by Gluconacetobacter xylinus NRRL B-759 Using Sugar Beet Molasses</i> Y. Emre ÖZ, Mehmet KALENDER.....	31-36
6. Laplace Dönüşümü Kullanarak Kriptografinin Yeni Bir Metodunun Kriptoanalizi <i>Cryptanalysis of a New Method of Cryptography Using Laplace Transform</i> M.Tuncay Gençoğlu.....	37-40
7. Demiryolu Hattında Oto-Korelasyon Tabanlı Makas Geçiş ve Ray Yüzeyi Durum İzleme Yöntemi <i>Autocorrelation Based Switch Crossing and Rail Surface Tracking Method in Railway Line</i> Orhan Yaman, Mehmet Karaköse, İlhan Aydın, Erhan Akın.....	41-50
8. Sürtünme Kaynak Yöntemi ile Birleştirilmiş SCR 420/AISI 1040 Çelik Çiftlerinin Arayüzey Mikroyapı Özelliklerinin İncelenmesi <i>Investigation of Interface Microstructure Properties of SCR 420/AISI 1040 Steel Couple Welded by Friction Welding Process</i> Furkan SARSILMAZ, İhsan KIRIK, Mustafa AY.....	51-56
9. Nicel Birliktelik Kuralları İçin Çoklu Minimum Destek Değeri <i>Multiple Minimum Support Value For Quantitative Association Rules</i> Yalçın ATEŞ, Murat KARABATAK.....	57-65
10. Sosyal Medya Verileri için Etkili Bir Sınıflandırma Yaklaşımı <i>An Effective Classification Approach for Social Media Data</i> Fatih Ertam	67-73
11. Gauss Karışım Modeli ve Genlik Spektrumu Öznitelikleri ile Sesteki Gizli Bilginin Sezimlenmesi <i>Audio Steganalysis Using Gaussian Mixture Models and Magnitude Spectrum Features</i> Cemal HANİLCİ.....	75-79

12. Çok Düşük Frekanslı Sinyallerden Yıldırım Kaynaklı Elektron Yağışı Olaylarının Belirlenmesi <i>Determination of the Lightning-Induced Electron Precipitation Events from the Very Low Frequency Signals</i> Murat CANYILMAZ, Mehmet YAŞAR, Esat GÜZEL.....	81-86
13. Bor İlavesinin Toz Metal D2 Takım Çeliğinin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerine Etkisi <i>The Effect of Boron Addition on the Microstructure and Mechanical Properties of Powder Metal D2 Tool Steel</i> Özgür ÖZGÜN, Ali ERÇETİN, Zülküf BALALAN, H. Özkan GÜLSOY, Mahir UZUN.....	87-96
14. Yağ Pompasında Kullanılan Sikloidal Dişlilerin Parmak Freze ile CNC Freze Tezgâhlarında İmalatının Araştırılması <i>Investigation of the Manufacturing of Cycloidal Gears Used in Oil Pumps with the End Mill in CNC Milling Machines</i> Cihan ÖZEL, Yunus ORTAÇ, Turan GÜRGENÇ.....	97-110
15. Yarım Etkili, Tek Etkili ve Çift Etkili Absorpsiyonlu Soğutma Çevrimlerin Ekserji Analizi <i>Exergy Analyses of Half-Effect, Single-Effect and Double-Effect Absorption Cooling Cycles</i> Rabi KARAALİ.....	111-117
16. Donanım Tabanlı Trivium Akış Şifreleme Algoritmasının FPGA Ortamında Gerçekleştirilmesi <i>Hardware Based Trivium Stream Cipher Algorithm Implementation on FPGA Environment</i> Ali Murat GARİPCAN, Ebubekir ERDEM, Taner TUNCER.....	119-130
17. Isıl Çevrim Uygulanmış Al-Bronz Alaşımında Mikroyapı ve Aşınma Özelliklerinin Araştırılması <i>The Investigation of Tribological and Microstructural Properties of Thermal Cycles Applied Al-Bronze Alloys</i> Zülküf Balalan, Furkan Sarsılmaz.....	131-136
18. Transformatörde Polaritenin Önemi ve Deneysel Olarak Belirlenmesi <i>The Importance of Polarity in a Transformer and Its Experimental Determination</i> Hüseyin ALTUN.....	137-146
19. Düşük Karbonlu Çeliğin Korozyon Davranışına Hekzametilen Tetra Amin'in Etkisi <i>The Effect of Hexamethylene Tetramine on the Corrosion Behavior of Low Carbon Steel</i> Reşit YILDIZ.....	147-153
20. $(La_{0.9}Gd_{0.1})_{0.85}Ag_{0.15}MnO_3$ Manyetik Soğutucu Malzemede Kısmi Gd Değişiminin Yapısal, Manyetik ve Manyetik Soğutma Özellikleri Üzerine Etkisi <i>Effect of Partial Gd Substitution on Structural, Magnetic and Magnetic Cooling Properties in $(La_{0.9}Gd_{0.1})_{0.85}Ag_{0.15}MnO_3$ Magnetic Cooling Material</i> Ali Osman AYAŞ.....	155-162
21. Bir Fazlı Asenkron Motor V/f Hız Kontrolü <i>V/f Speed Control of Single Phase Induction Motor</i> Zeynep Bala DURANAY, Hanifi GÜLDEMİR.....	163-172
22. Farklı Katkılar İçeren Bitümlü Sıcak Karışımların Yorulma Ömürlerinin İncelenmesi <i>Investigation of Fatigue Lives of Hot Mix Asphalts Including Various Additives</i> Mehmet YILMAZ, Baha Vural KÖK, Erkut YALÇIN.....	173-183
23. Bir-Fazlı İndüksiyon Motorlar İçin Paralel Aktif Güç Filtresi Tabanlı Reaktif Güç Kompanzasyonu <i>Reactive Power Compensation for Single-Phase Induction Motor Based Parallel Active Power Filter</i> Mehmet GEDİKPINAR, Mustafa GÜNGÖR.....	185-193

24. PTA Kaplamalarda Abrasive Aşınma Davranışının Değerlendirilmesinde; Bir Taguchi Yaklaşımı <i>The Evaluating Of Abrasive Behavior In PTA Coatings; A Taguchi Approach</i> Ali Kaya GÜR, Sinan KAYA.....	195-202
25. GTAW Yöntemi ile Oluşturulan FeB-FeTi-FeW-C Kaplamalarının Mikroyapı ve Adhesiv Aşınma Davranışının İncelenmesi <i>Investigation of Adhesive Wear Behavior and Microstructure of FeB-FeTi-FeW-C Coatings Produced by GTAW Method</i> Zülküf BALALAN, Mehmet YAZ, Serdar Osman YILMAZ.....	203-212
26. Membran Sentezinde Koagülasyon Banyosunun ve Polivinil Prolidon Eklenmesinin Tıkanma Üzerine Etkileri <i>Fouling Effects of the Coagulation Bath and Polyvinylpyrrolidinone Addition During Membrane Synthesis</i> Evrin Çelik Madenli, Özgür Çakmakçı, Kemal Aktaş, Ulaş Aygör.....	213-219
27. Doğrusal Kanallara Yerleştirilen Üçgen Labirent Yan Savaklarda Kret Uzunluğu Değişiminin Debi Katsayısına Etkisi <i>Influence on Discharge Coefficient of Crest Length Change in Triangular Labyrinth Side Weirs Placed in Straight Channels</i> Nihat KAYA.....	221-230
28. IRI ve IONOLAB Toplam Elektron İçeriğinin Şiddetli Jeomanyetik Fırtınalara Tepkisinin Karşılaştırılması <i>Comparison of Response to Extreme Geomagnetic Storms of IRI-2012 and IONOLAB TEC Values</i> Ramazan ATICI.....	231-240
29. Maddi Hasarlı Trafik Kazaları İçin Sinirsel-Bulanık Ağ Tabanlı Bir Kusur Tespit Modeli <i>A Fault Detection Model Based on Neuro-Fuzzy Network for Property Damage Only Traffic Accidents</i> Çiğdem ACI, Ali Can YILMAZ.....	241-250
30. Taşıt Ağları için Yeni Bir Çok Kanallı Ortam Erişim Kontrol Protokolü Yaklaşımı <i>A New Multi-Channel Media Access Control Protocol Approach for Vehicular Networks</i> Fikri AĞGÜN, Musa ÇIBUK, Shafqat UR REHMAN.....	251-258
31. Elazığ İli Merkez İlçesi Hal Köyü'nde Korunan ve Otlatılan Alanların Botanik Kompozisyon Bakımından Karşılaştırılması <i>Comparison with Regard to Grazed and Non-Grazed Areas Botanical Composition in Hal Village of Elazig Province</i> Halil KARAN, Mehmet BAŞBAĞ.....	259-264
32. Buck-Boost Dönüştürücü Tasarımı, Modellenmesi ve Kontrolü <i>Buck-Boost Converter Design, Modeling and Control</i> Abuzer ÇALIŞKAN, Sencer ÜNAL, Ahmet ORHAN.....	265-268
33. FIR Filtre Tasarımı ve FPGA Ortamında Gerçeklenmesi <i>Design and Implementation of FIR Filter on FPGA Platform</i> Erman ÖZPOLAT, Barış KARAKAYA, Arif GÜLTEN.....	269-275

Basit Brayton Çevriminde Elektrik Üretimi Maliyetinin Parametrik Analizi

Burhanettin Çetin

Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Fakültesi, 34349 Beşiktaş / İstanbul
cetin@yildiz.edu.tr

(Geliş/Received:28.06.2016; Kabul/Accepted: 06.07.2017)

Özet

Bu çalışmada, kompresör basınç oranı, çevre sıcaklığı, türbin izentropik verimi ve kompresör izentropik verimi değişken parametre olarak alınarak, basit Brayton çevrimi için elektrik enerjisi üretimi maliyetinin parametrik analizi yapılmıştır. İncelemelerde, diğer parametreler sabit kabul edilmiş ve bütün termodinamik ve ekonomik ifadeler bu karar değişkenlerinin fonksiyonu olarak ifade edilmiştir. Sonuç olarak, oluşturulan model çözümlenmiş ve elektrik üretimi maliyetini minimum yapan optimum işletme şartları belirlenmeye çalışılmıştır. Sadece performans dikkate alındığında her bir parametre için net gücü ve ısı verimi maksimum yapan iki farklı kompresör basınç oranı bulunmuştur. Isıl verim için bu oran daima daha yüksektir. Brayton çevriminin teknik açıdan optimum çalışma aralığı ise, bu iki değer arasında olmalıdır. Aynı parametreler için yapılan ekonomik analiz sonuçları ise, elektrik üretimi maliyetini minimum yapan basınç oranının, teknik çalışma aralığı içinde olduğunu göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Brayton çevrimi, Gaz türbini, Elektrik üretimi maliyeti, Isıl verim

Parametric Analysis of Electricity Production Cost for Simple Brayton Cycle

Abstract

In this study, parametric analysis of electricity production cost for simple Brayton cycle is studied under different compressor pressure ratio, ambient temperature, gas turbine isentropic efficiency and compressor isentropic efficiency. The others variables are assumed constant. In the analysis, all thermodynamic and economic expressions are formulated as the function of these variables. Consequently, developed model is solved and the optimum conditions giving minimum electricity production cost are identified. It is determined that there are two optimum compressor pressure ratios for simple Brayton cycle: one maximizes the power, the other maximizes the efficiency, technically. The optimum compressor pressure ratio for efficiency is always higher than the optimum compressor pressure ratio for power. Optimum economic values that minimized electricity production cost are different from technic values. Therefore, optimum compressor pressure ratio should be chosen between these technic values, techno-economically.

Keywords: Brayton cycle, Gas turbine, Electricity production cost, Thermal efficiency

1. Giriş

Brayton çevrimi ilk olarak 1870'li yıllarda George Brayton tarafından geliştirilen yağ yakan pistonlu motorlarda kullanılmak üzere önerilmiştir. Günümüzde ise Brayton çevriminin kullanımı, sıkıştırma ve genişleme işlemlerinin eksenel kompresör ve türbinlerde gerçekleştirildiği gaz türbinleri ile sınırlıdır. 1930'larda ilk tasarlandıklarından günümüze kadar geçen süre

inde de gaz türbinlerinde çok önemli gelişmeler olmuştur. İlk tasarlanan gaz türbinleri, düşük izentropik verimler ve gaz türbin girişi sıcaklıklarından dolayı oldukça düşük (yaklaşık %17) ısı verime sahiptiler. Bundan dolayı da, birçok avantajı olmasına rağmen o dönemlerde kullanımı çok yaygınlaşmamıştır. Fakat, günümüzde gaz türbinleri yüksek güç/ağırlık oranı

sahip olmaları, az yer kaplamaları, basit ve hafif olmaları, kurulum sürelerinin kısa olması, hızlı devreye girip çıkabilmeleri, güvenilirlik ve kullanılabilirliklerinin yüksek olması, farklı yakıtları yakabilmeleri, çevre dostu olmaları, işletme&bakım ve yatırım maliyetlerin düşük olması vb özelliklerinden dolayı, kendisine oldukça fazla uygulama alanı bulmuştur [1-11]. Bu uygulama alanlarından bazıları şöyledir:

- Elektrik güç santralleri,
- Uçak ve helikopterler,
- Gaz nakil hatlarındaki pompalama istasyonları,
- Lokomotifler,
- Gemiler,
- Tank ve taşıma araçları (otomotiv gaz türbinleri),

Teknolojideki son gelişmeler gaz türbinlerinin güç kaynağı olarak, havacılık dışındaki farklı alanlarda kullanılan pistonlu motorlarla rekabet edebilir hale gelmesine neden olmuştur. Donanmaların büyük bir bölümünde gaz türbinleri hem gerekli itici gücü sağlamak, hem de elektrik üretmek için kullanılmaktadır. General Electric tarafından gemilerin tahrikinde kullanılmak üzere geliştirilen basit Brayton çevrimli LM2500 tipi gaz türbinleri yaklaşık %37 termik verime sahiptir. Yine General Electric tarafından üretilen ara soğutmalı ve rejeneratörlü WR-21 tipi gaz türbinleri, yaklaşık %43 termik verimle 21,6 MW güç üretmektedir. Buhar türbinleri ve dizel motorlarıyla kıyaslandığında gaz türbinleri daha güvenilir ve uzun ömürlü olup, daha yüksek güç/ağırlık ve güç/hacim oranına sahiptir. Ayrıca daha hızlı devreye girip çıkabilirler ve işletmeleri de daha kolaydır. Örneğin, bir buhar türbininin devreye girmesi yaklaşık dört saati bulurken, gaz türbini iki dakika gibi kısa bir sürede devreye girebilmektedir. Günümüzde birçok gemide gaz türbini ve dizel motor birlikte kullanılmaktadır. Dolayısıyla gemilerde düşük güçlerde ve seyrüsefer süresince yüksek verimli olduğu için dizel motorları kullanılmakta, basit çevrimli gaz türbinleri ise yüksek yakıt tüketimine

sahip olduğu için yüksek hız ve güç gerektiğinde devreye girmektedir [9].

Günümüzde gaz türbinleri yaygın olarak uçaklarda ve elektrik güç santrallerinde kullanılmaktadır. Uçaklarda kullanılan gaz türbini, sadece kompresör ve yardımcı makinelerin ihtiyacı olan gücü üretir. Uçağı iten gücü ise yüksek hızla türbinden dışarı atılan gazlar sağlamaktadır [9]. Gaz türbinleri ayrıca kara tesislerinde güç üretmek için tek başına veya buharlı güç santralleriyle beraber kombine çevrim santralinde de kullanılmaktadır. Kombine çevrim santralleri, gaz türbinleri ile buhar türbinlerinin beraber kullanıldığı sistemlerdir. Günümüzde buharlı güç santrallerinde en yüksek türbin girişi sıcaklığı yaklaşık 700 °C mertebelerinde iken, bu sınır gaz türbin güç santrallerinde yaklaşık 1400 °C seviyelerine kadar ve uçaklarda kullanılan gaz türbinlerinde ise daha da yüksek sıcaklıklara çıkılabilmektedir [9-10]. Gaz türbin çevriminde türbin kanatlarında havayla etkin soğutma yapılabilmesi ve kanatların seramik gibi yüksek sıcaklığa dayanıklı malzemelerle kaplanmasından dolayı yüksek sıcaklıklara çıkılabilmesine rağmen, gazlar türbini çok yüksek sıcaklıklarda terk ettikleri için, yüksek termik verimlere ulaşamamaktadır. [1, 9, 10, 12].

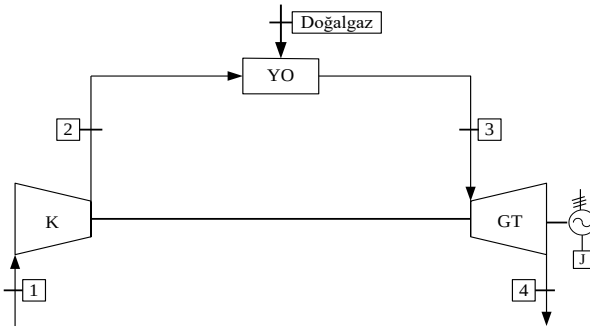
Birincil enerji kaynakları bakımından fakir olan ülkelerin dışa bağımlılığını azaltmak, emisyon tasarrufu sağlamak, yerli kaynakların kullanım ömrünü uzatmak ve enerji üretimi maliyetlerini düşürmek için enerji dönüşümlerini yüksek verimle ve düşük maliyetle gerçekleştirmeleri oldukça önemlidir. Bu nedenle güç çevrimlerinde termik verimi arttırmak üzere hem bilim hem de mühendislik çevrelerince yoğun çalışmalar yürütülmektedir.

Bu çalışmada, basit Brayton çevrimi için birim elektrik enerjisi üretimi maliyeti üzerine çevre sıcaklığı ile türbin ve kompresör izentropik verimlerinin teorik olarak etkisi araştırılmıştır. Analizlerde elektrik enerjisi üretimi maliyeti basınç, sıcaklık, debi, yakıt fiyatı, faiz oranı ve iskonto oranı gibi teknik ve ekonomik büyüklükler cinsinden yazılmıştır. Ekipman yatırım maliyetleri de teknik

büyükliklere bağlı olarak ifade edilerek, teknik ve ekonomik çözümler birlikte ele alınmıştır. Sonuç olarak, geliştirilen model çözümlenmiş ve incelenen her bir parametre için minimum elektrik üretimi maliyetini veren en uygun çalışma koşulları bulunmuştur.

2. Basit Brayton Çevriminin Sistem Yapısı

Şekil 1’de bu çalışmada incelenen basit Brayton çevriminin prensip şeması verilmiştir. Şekilde K kompresörü, YO yanma odasını, GT gaz türbinini ve J jeneratörü temsil etmektedir. Sistemin çalışma prensibi kısaca şu şekildedir:



Şekil 1. Basit Brayton çevriminin prensip şeması

Elektrik enerjisi üretimi sistemleri oldukça karmaşık yapıdır. Gerçek bir tesis ele alındığında irili ufaklı birçok ekipman vardır. Dolayısıyla bu sistemlerin analizleri yapılırken de bazı kabullerin yapılması gerekir. Kabul edilebilir hata sınırları içinde kalmak koşuluyla yapılan bu kabuller, analiz sonuçlarını doğal olarak etkilemekle birlikte, pratik bir değerlendirme yapılmasına da olanak sağlar. Bu çalışmada yapılan kabuller şöyledir:

- Hava ve yanma ürünlerine ideal gaz prensibi uygulanmıştır.
- Yakıt olarak doğalgaz alınmış ve yanmanın tam yanma olduğu kabul edilmiştir.
- Doğalgazın alt ısı değeri 8250 kcal/m^3 olarak alınmıştır.
- Sistemdeki ana elemanlar (kompresör, yanma odası ve gaz türbini) sürekli akışlı açık sistem olarak alınmıştır.

- Çevre sıcaklığı 298 K , çevre basıncı 1 bar alınmıştır.
- Çevrimde türbin izentropik verimi $\%87$, kompresör izentropik verimi $\%85$, yanma verimi $\%99$ ve mekanik verim $\%98$ alınmıştır.
- Çevrimdeki basınç kayıpları kompresör-türbin arasında $\%5$, çıkışta ise $\%3$ alınmıştır.
- Gaz türbin giriş sıcaklığı (TGS) 1400 K alınmıştır.

Kompresör izentropik verimi, ideal kompresör işinin gerçek kompresör işine oranıdır. Türbin izentropik verimi ise, gerçek türbin işinin ideal işe oranıdır. Dolayısıyla, tersinmezliklerden dolayı gerçekte kompresör ideale göre daha fazla enerji harcar, türbin ise daha az enerji üretir. Analizlerde bu tersinmezliklerin etkisini dikkate almak için izentropik verimler kullanılır. Yine akışın olduğu yerde sürtünme, dolayısıyla basınç kayıpları meydana gelir. Türbin çıkışında da gazların atmosfere atılabilmesi için çıkış basıncının atmosfer basıncından biraz büyük olması gerekir. Sistemdeki bağlantı elemanlarındaki (boru, dirsek, vana vb.) ve çıkıştaki bu basınç kayıplarının gerçek çözümlerde dikkate alınması gerekir. Bu çalışmada tersinmezliklerin etkisi de dikkate alınarak, mümkün olduğunca gerçekçi çözümler bulunmaya çalışılmıştır.

3. Brayton Çevriminin Teknoekonomik Analizi

Literatürde basit Brayton çevriminin teknik ve ekonomik hesaplamalarıyla ilgili oldukça fazla çalışma vardır ve ilgili denklemlere kapsamlı olarak bu çalışmalardan ulaşılabilir [6, 7, 13-15]. Dolayısıyla bu çalışmada teknoekonomik analiz için temel denklemler üzerinden metodoloji açıklanmaya çalışılacaktır.

Basit Brayton çevriminde performans açısından net güç ve ısı veriminin mümkün olduğunca yüksek olması beklenir. Çevrimin net

gücü (N_{net}), gaz türbin (N_{GT}) ve kompresör güçlerinin (N_K) farkına eşittir (Denklem 3). Çevrime giren ısı enerjisinin mekanik enerjiye dönüşüm oranını gösteren ısı verim ise, net gücün yanma odasında verilen ısı güce (N_{YO}) oranından bulunabilir (Denklem 5).

$$N_{GT} = \dot{m}_g \cdot \left[C_{pg}(T_3) \cdot T_3 - C_{pg}(T_4) \cdot T_4 \right] \quad (\text{kW}) \quad (1)$$

$$N_K = \dot{m}_h \cdot \left[C_{ph}(T_2) \cdot T_2 - C_{ph}(T_1) \cdot T_1 \right] \quad (\text{kW}) \quad (2)$$

$$N_{net} = \eta_m \cdot N_{GT} - \frac{N_K}{\eta_m} \quad (\text{kW}) \quad (3)$$

$$N_{YO} = \dot{m}_y \cdot Hu \cdot \eta_y \quad (\text{kW}) \quad (4)$$

$$\eta_{ısıl} = \frac{N_{net}}{N_{YO}} \quad (5)$$

Denklemlerde, T_1 (KGS) kompresör giriş (çevre) sıcaklığını, T_2 kompresör çıkış sıcaklığını, T_3 türbin giriş sıcaklığını, T_4 türbin çıkış sıcaklığını, $\dot{m}_h$ (kg/s) hava debisini, $\dot{m}_g$ (kg/s) gaz debisini, $\dot{m}_y$ (kg/s) yakıt debisini, Hu (kJ/kg) doğalgazın alt ısı değerini, η_y yanma verimini, η_m mekanik verimi, c_{ph} ve c_{pg} (kJ/kgK) ise sırasıyla havanın ve gazların sabit basınçta özgül ısı kapasitelerini göstermektedir. Analizlerde özgül ısılar sıcaklığın fonksiyonu olarak dikkate alınmıştır [7, 14]. Kompresör çıkış sıcaklığı T_2 ve türbin çıkış sıcaklığı T_4 Denklem 6- 7'den bulunabilir.

$$T_2 = T_1 \cdot \left[1 + \frac{P_{rc}^{(k_h-1)/k_h} - 1}{\eta_k} \right] \quad (\text{K}) \quad (6)$$

$$T_4 = T_3 \cdot \left[1 - \eta_t \cdot \left(1 - \frac{1}{P_{rt}^{(k_g-1)/k_g}} \right) \right] \quad (\text{K}) \quad (7)$$

$$P_{rc} = \frac{P_2}{P_1} \quad (8)$$

$$P_3 = P_2 \cdot (1 - BK_{KT}) \quad (\text{bar}) \quad (9)$$

$$P_4 = P_1 \cdot (1 + BK_C) \quad (\text{bar}) \quad (10)$$

$$P_{rt} = \frac{P_3}{P_4} \quad (11)$$

Burada; P_{rc} kompresör basınç oranı, P_{rt} türbin basınç oranını, k_h havanın özgül ısı oranını, k_g gazların özgül ısı oranını, η_k kompresör izentropik verimini, η_t türbin izentropik verimini, BK_{KT} kompresör-türbin arası ve BK_C de çıkıştaki basınç kayıp oranını göstermektedir (Denklem 6-11).

3.1. Ekonomik analiz

Enerji üretimi sistemleri için belirlenecek birim elektrik enerjisi üretimi maliyetleri, sistemlerin değerlendirilmesinde ve birbiriyle karşılaştırılmasında kullanılabilir.

Elektrik enerjisi üretimi maliyeti ise yatırım, yakıt ve işletme&bakım olmak üzere üç ana masraf grubundan oluşur. Erdem ve Sevilgen [16] çalışmalarında, basit Brayton güç sistemlerinde işletme ve bakım masraflarının toplam maliyet içindeki payının, yatırım ve yakıt masraflarının payına göre oldukça düşük olduğunu ve optimum sonuçları değiştirmedikçe göstermişlerdir. Dolayısıyla, bu makalede işletme ve bakım masraflarının etkisi dikkate alınmamıştır.

Elektrik enerjisi üretimi maliyetini hesaplamak için farklı yöntemler vardır ve hepsinden benzer sonuçları bulmak mümkündür. Bu çalışmada bir değere getirilmiş yıllık maliyet yöntemi kullanılmıştır

[15]. Bu yöntemde sistemin ekonomik ömrü boyunca yapılan tüm masraflar yıllık masrafa dönüştürülür ve bu değer yıllık elektrik enerjisi üretimini miktarına bölünerek elektrik enerjisi üretimi maliyeti (g) bulunur.

3.1.1. Toplam yatırım maliyeti

Basit Brayton çevriminin direkt yatırım maliyeti (I) sırasıyla gaz türbini (I_{GT}), yanma odası (I_{YO}), kompresör (I_K), ve jeneratör (I_J) yatırım maliyetlerinin toplamından oluşmaktadır (Denklem 12). Bu çalışmada, literatürde verilen ekipmanların geometrik ve termodinamik özelliklerine bağlı yatırım maliyet denklemleri kullanılmıştır [14].

$$I = I_{GT} + I_{YO} + I_K + I_J \quad (\$) \quad (12)$$

İnşaat süresince kullanılan malzeme, ekipman ve işçilik fiyatlarında artış olacaktır. Bu artışa fiyat güncellenmesi (eskalasyon) denir. Dolayısıyla, inşaat süresince yapılacak yatırımlar için önceden bir harcama dağılım modeli belirlenerek fiyat güncellenmesi yükünün bulunması gerekir. İnşaat süresince yapılan yıllık fiyat güncellenmiş (eskale edilmiş) harcama miktarının kredi olarak alındığı kabul edilerek, inşaat periyodunun bu miktarı ilave olarak da bir faiz yükünün geri ödenmesi gerekir. Fiyat güncellenmesi ve faiz yükü dikkate alındığında inşaatın bitimindeki toplam yatırım maliyeti (I_T) aşağıdaki eşitlikten bulunabilir.

$$I_T = I \cdot \sum_{t=1}^L y(t) \cdot (1+e)^t \cdot (1+i)^{L+1-t} \quad (\$) \quad (13)$$

Burada e fiyat güncellenmesi oranını, i faiz oranını, L inşaat süresini, y(t) herhangi bir t yılına ait yıllık harcama dağılım oranını göstermektedir. Bu çalışmada fiyat güncellenmesi oranı (e) %2, faiz oranı (i) %7, inşaat süresi (L) 3 yıl ve harcama dağılım oranı y(t) de birinci yıl için %25, ikinci yıl için %35 ve üçüncü yıl için %40 alınmıştır.

3.1.2. Yıllık sabit sermaye ve yakıt maliyeti

Toplam yatırım maliyeti (I_T), amortisman katsayısı (AK) kullanılarak yıllık sabit sermaye maliyetine (C_s) dönüştürülür (Denklem 14). Yıllık sabit yakıt maliyeti (C_y) ise Denklem 16'dan bulunabilir.

$$C_s = I_T \cdot AK \quad (\$/yıl) \quad (14)$$

$$AK = \frac{r \cdot (1+r)^n}{(1+r)^n - 1} \quad (15)$$

$$C_y = \frac{3600 \cdot 8760 \cdot N_{net} \cdot YF \cdot F_y}{Hu \cdot \eta_{ısı}} \quad (\$/yıl) \quad (16)$$

Burada r iskonto oranını, n sistemin ekonomik ömrünü, N çevrimin net gücünü, YF yük faktörünü, F_y (\$/kg) yakıt fiyatını, Hu kullanılan yakıtın alt ısı değerini, $\eta_{ısı}$ çevrimin ısı verimini göstermektedir. Yük faktörü santralin bir yıl boyunca ürettiği elektriğin, o yıl içerisinde tam kapasite ile çalışması durumunda üreteceği elektriğe oranıdır. Bu çalışmada iskonto oranı %9, ekonomik ömür 20 yıl, yük faktörü %75, yakıt fiyatı 0,381823 \$/kg (0,805383 TL/m³) olarak alınmıştır. Analizlerde yakıt fiyatı olarak, KDV hariç 15 Haziran 2016 tarihli BOTAŞ sanayi fiyatı alınmıştır [17].

3.1.3. Elektrik üretimi maliyeti

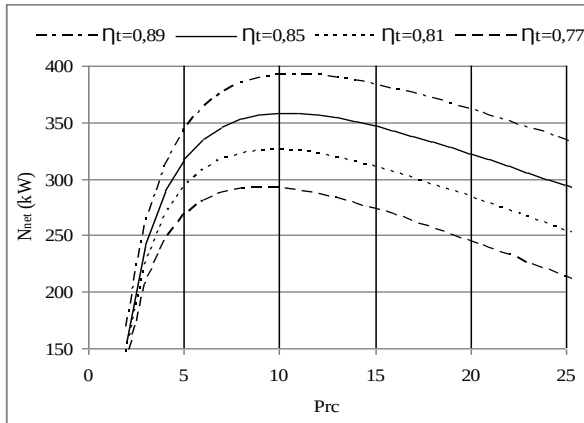
Elektrik enerjisi üretimi maliyeti (g) Denklem 17 kullanılarak bulunabilir. Burada C_s ve C_y sırasıyla yıllık sabit sermaye ve yakıt maliyetini, E ise yıllık elektrik enerjisi üretimi miktarını temsil etmektedir.

$$g = \frac{C_s + C_y}{E} \quad (\$/kWh) \quad (17)$$

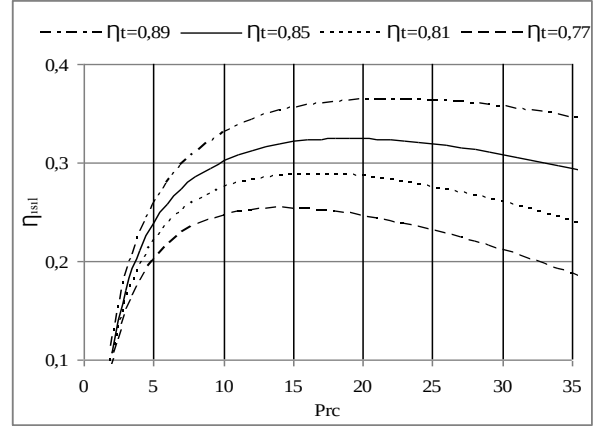
$$E = 8760 \cdot YF \cdot N_{net} \quad (kWh/yıl) \quad (18)$$

4. Uygulama ve Tartışma

Türbin izentropik verimi (η_t) %88 ile %89 arasında değiştirilerek, kompresör basınç oranının (Prc) net güç (N_{net}), ısı verim ($\eta_{ısı}$) ve elektrik üretimi maliyeti (g) ile değişimleri sırasıyla Şekil 2-4'de verilmiştir. Kompresör basınç oranı sabit tutulduğunda, türbin izentropik veriminin artmasıyla net güç ve ısı verim yükselmekte, elektrik üretimi maliyeti ise azalmaktadır. Belirli bir türbin izentropik verimde ise, kompresör basınç oranının artması ile hem net güç hem de ısı verim önce artmakta, bir maksimumdan geçip daha sonrada düşmektedir. Elektrik üretimi maliyeti ise kompresör basınç oranının artması ile önce azalmakta, daha sonra ise bir minimumdan geçip artmaktadır. Dolayısıyla, her türbin izentropik verimi için net gücü ve ısı verimi maksimum yapan optimum bir kompresör basınç oranı vardır ve ısı verim için bu oran net güç için olan değerden daima daha yüksektir (Tablo 1). Benzer şekilde, her türbin izentropik verimi için elektrik üretimi maliyetini minimum yapan optimum bir kompresör basınç oranı vardır ve aynı şartlarda ekonomik açıdan optimum kompresör basınç oranı ise net güç ve termik verimi maksimum yapan optimum değerler arasında kalmaktadır (Tablo 1). Farklı türbin izentropik verim değerleri için, hem performans (net güç ve ısı verim) hem de ekonomik açıdan optimum noktalar Tablo 1'de verilmiştir.



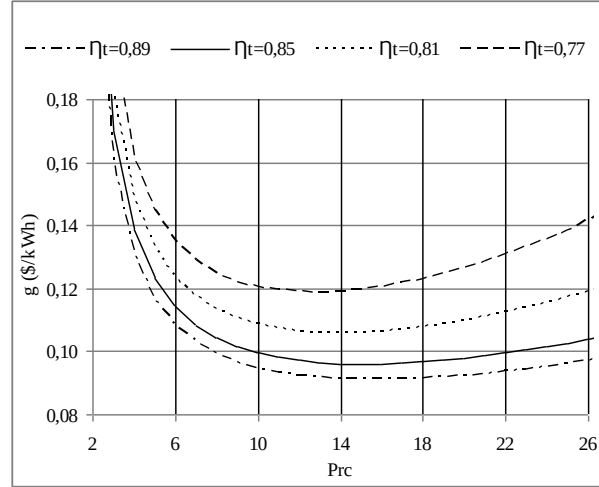
Şekil 2. Kompresör basınç oranı ile net gücün değişimi



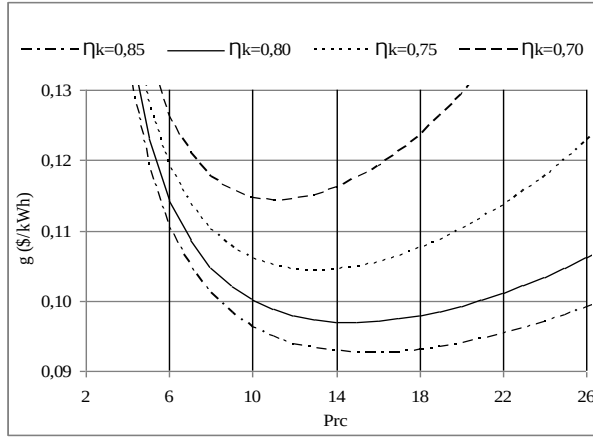
Şekil 3. Kompresör basınç oranı ile termik verimin değişimi

Tablo 1. Türbin izentropik verimi için optimum değerler

η_t (%)	$N_{net,max}(kW); P_{rc,opt}$	$\eta_{ısı,max}; P_{rc,opt}$	$g_{min}(\$/kWh); P_{rc,opt}$
77	292,9; 9	0,2538; 14	0,1187; 13
81	325,3; 10	0,2881; 16	0,1059; 14
85	358,3; 10	0,3250; 19	0,0960; 15
89	391,8; 11	0,3641; 22	0,0910; 16



Şekil 4. Kompresör basınç oranı ile elektrik üretimi maliyetinin değişimi



Şekil 5. Kompresör basınç oranı ile elektrik üretimi maliyetinin değişimi

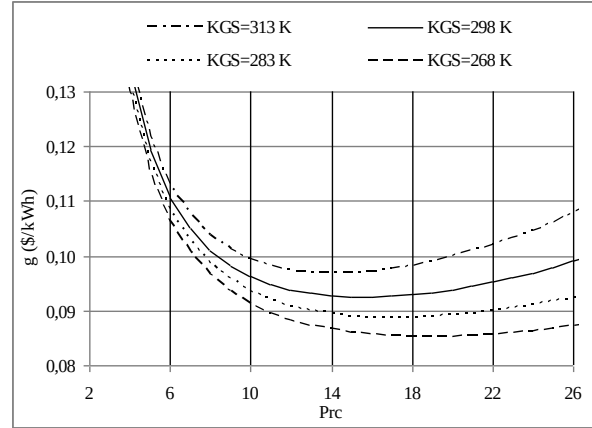
Şekil 5’de kompresör izentropik veriminin (η_k), elektrik üretimi maliyetine (g) etkisi gösterilmiştir. Tablo 2’de ise elektrik üretimi maliyetini minimum yapan optimum değerler verilmiştir. Türbin izentropik veriminde olduğu gibi, kompresör izentropik verimi ve kompresör basınç oranının (Prc) artmasıyla maliyet de düşmekte, optimum kompresör basınç oranı ise yükselmektedir (Tablo 2).

Tablo 2. Kompresör izentropik verimi için ekonomik açıdan optimum değerler

η_k (%)	$g_{min} (\$/kWh); P_{rc,opt}$
70	0,1142 ; 11
75	0,1043 ; 13
80	0,0970 ; 15
85	0,0925 ; 16

Şekil 6’da farklı kompresör giriş (çevre) sıcaklığında, kompresör basınç oranının (Prc) elektrik üretimi maliyetiyle (g) değişimi verilmiştir. Çevre sıcaklığı azaldıkça elektrik üretimi maliyeti düşmektedir. Dolayısıyla sıcak bölgelerde gaz türbinlerinin çalıştırılması gerekiyorsa, kompresör girişinde havanın soğutulmasıyla ilgili yatırımların dikkate alınması anlamlı olabilir. Çünkü kompresör

girişinde havanın soğutulmasıyla havanın özgül hacmi düşmekte ve kompresörün harcadığı enerji azalmaktadır. Sonuçta elektrik üretimi maliyeti düşmektedir. Dolayısıyla soğutma için yapılan yatırımın geri dönüşü de daha kısa sürede gerçekleşebilir.



Şekil 6. Kompresör basınç oranı ile elektrik üretimi maliyetinin değişimi

5. Sonuçlar

Bu çalışmada basit Brayton çevriminin analizden elde edilen sonuçlar şöyledir:

1. Kompresör ve türbin izentropik verimleri imalat şekline yani üreticinin hassasiyetine ve üretimi kalitesine bağlıdır. Bu değerlerin mümkün olduğunca büyük olması istenir. Fakat izentropik verimler artınca hem performans hem de masraflar yükselmektedir. Dolayısıyla çözüm için hem performansı hem de maliyeti dikkate alan yöntemlerin (teknöekonomik analiz vb) kullanılması daha anlamlı olur.
2. Bu çalışmada, sadece performans dikkate alındığında her bir parametre için net gücü ve ısı verimi maksimum yapan iki farklı kompresör basınç oranı bulunmuştur. Isıl verim için bu oran daima daha yüksektir. Brayton çevriminin teknik açıdan optimum çalışma aralığı ise, bu iki değer arasında olmalıdır. Aynı parametreler için yapılan ekonomik analiz sonuçları ise, elektrik üretimi maliyetini

minimum yapan basınç oranının, teknik çalışma aralığı içinde olduğunu göstermiştir. Örneğin $\eta_t=0,89$ için net gücü ve termik verimi maksimum yapan optimum kompresör basınç oranı sırasıyla 11 ve 22, elektrik enerjisi üretimi maliyetini minimum yapan optimum kompresör basınç oranı ise 16 olarak bulunmuştur. Dolayısıyla, maliyet etkisi dikkate alınmadan sadece performansa göre yapılacak bir seçim çok doğru olmayabilir. Çünkü bu durumda maliyet çok artabilir. Dolayısıyla hem performansı hem de maliyeti dikkate alarak optimum çalışma noktasının belirlenmesi gerekir.

3. Kompresör giriş (çevre) sıcaklığı azaldığında elektrik üretimi maliyeti düşmektedir. Dolayısıyla sıcak bölgelerde, kompresör girişinde havanın soğutulması önemli avantajlar sağlayabilir. Bu ise beraberinde ilave bir yatırım ve işletme masrafı getirecektir. Sonraki çalışmalarda bu ilave masrafları dikkate alan yeni çözümler bulunabilir. Dolayısıyla bu çalışma diğer çalışmalar için referans bir kaynak olarak kullanılabilir.

6. Kaynaklar

1. Noroozian, A., Bidi, M. (2016). An Applicable Method for Gas Turbine Efficiency Improvement. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 28, 95-105.
2. Al-Attar, K., Zainal, Z., (2015). Externally Fired Gas Turbine Technology. *Applied Energy*, 138, 474–87.
3. Benaboud, A., Rufer, A. (2016). Gas Turbine: Optimization of Energy Production and High Efficiency by Using Power Electronics. *Procedia Engineering*, 138, 337-346.
4. Küçükşahin, F. (2007). Buhar ve Gaz Türbinleri. Birsan Yayınevi, İstanbul.
5. Polyzakis, A.L., Koroneos, C., Xydis, G (2008). Optimum Gas Turbine Cycle for Combined Cycle Power Plant. *Energy Conversion and Management*, 49, 551–563.
6. Çetinkaya, S. (1999). Gaz Türbinleri. Nobel Yayınları, Ankara.
7. Çetin, B. (2006). Gaz Türbinlerinin Optimum Performans Analizi. *Doğuş Üniversitesi Dergisi*, 7, 59-71.
8. Teppenstall, T. (1998). Advanced Gas Turbine Cycles for Power Generation: A Critical Review. *Applied Thermal Engineering*, 18, 837-846.
9. Çengel, Y.A., Boles, M.A. (2008). Termodinamik: Mühendislik Yaklaşımıyla. Güven Kitabevi, İzmir.
10. Horlock, J.H. (1997). Aero-engine Derivative Gas Turbines for Power Generation: Thermodynamic and Economic Perspectives. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 119, 119-123.
11. Büyüktürk, A.R. (1995). Termodinamik:Cilt:2, Uludağ Üniversitesi Basımevi, Bursa.
12. Woudstra, N., Woudstra, T., Pirone, A., Stelt, T. (2010). Thermodynamic Evaluation of Combined Cycle Plants. *Energy Conversion and Management*, 51, 1099–1110.
13. Bejan, A., Tsatsoranis, G, Moran, M. (1995). Thermal Desing and Optimization. New York.
14. Silveira, J.L., Tuna, C.E. (2003). Thermoeconomic Analysis Method for Optimization of Combined Heat and Power Systems. *Progress in Energy and Combustion Science*, 29, 479-485.
15. Aybers, N., Şahin, B. (1995). Enerji Maliyeti. YTÜ Matbaası, İstanbul.
16. Erdem H.H., Sevilgen S.H. (2002). Maliyet Bölümlerinin Ağırlıkları ile Elektrik Üretim Teknolojilerinin Yük-Süre Eğrisindeki Sıralamanın Belirlenmesi. 7. *Uluslararası Yanma Sempozyumu*, Ankara, 503-515.
17. <http://www.tesisat.com.tr/yayin/yakit-fiyatlari>

CuAlCr Şekil Hatırlamalı Alaşıma Yaşlandırma Sıcaklığı ve Yaşlandırma Zamanının Etkileri

Mediha KÖK^{a*}, Z. Deniz YAKINCI^b, Yıldırım AYDOĞDU^c, Ayşe AYDOĞDU^c

^{a*}Fırat üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü, Elazığ, TÜRKİYE

^bİnönü Üniversitesi Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu, Malatya, TÜRKİYE

^cGazi üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü, Ankara, TÜRKİYE

*msoglu@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 17.11.2017; Kabul/Accepted: 28.04.2017)

Özet

Bu çalışmanın amacı, CuAlCr yüksek sıcaklık şekil hatırlamalı alaşımın özelliklerinin yaşlandırma ile geliştirmektir. Bu amaç çerçevesinde, CuAlCr alaşımına farklı zamanlar ve farklı sıcaklıklar için yaşlandırma uyguladık. Seçilen yaşlandırma sıcaklıkları 500 ve 700 °C ve zaman aralığı bir, iki, üç ve dört saattir. 500 °C yaşlandırma sıcaklığı için dönüşüm sıcaklığı görülmemiştir. Buna göre, Bu yaşlandırma sıcaklığının uygun olmadığı söylenebilir. 700 °C yaşlandırma sıcaklığı için, alaşım dönüşüm sıcaklığı göstermektedir ve dönüşüm sıcaklığı değeri artan yaşlandırma zamanıyla artmaktadır. Dönüşüm sıcaklığı pik değeri, 350 °C ve 431 °C sıcaklığı aralığında değişmektedir. CuAlCr alaşımının X ışınları ölçümleri de yapılmıştır. Alaşımın kristal yapısında herhangi bir değişimi görülmezken, x ışınları pik şiddetinin artan yaşlandırma zamanıyla arttığı görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Şekil hatırlamalı alaşım, Yaşlandırma, Martensitik dönüşüm

The Effects of Ageing Temperature and Ageing Time on CuAlCr Shape Memory Alloy

Abstract

Aim of this study, to improve properties of CuAlCr high temperature shape memory alloy by ageing procedure. In accordance with this purpose, we applied ageing CuAlCr alloy for different times and different temperature. Chosen ageing temperatures are 500 and 700 °C and times range are between one,two,three and four hours. Transformation temperature of CuAlCr alloy for 500 °C ageing temperature is not seen. It can be concluded that this ageing temperature is not suitable. For 700 °C ageing temperature, alloys show transformation temperature and transformation temperature was decreased by increasing ageing time. Transformation peak temperatures were decreased between 350 °C and 431 °C temperature range. The X ray analysis of CuAlCr alloys were done. The crystal structure of alloys did not change but, intensity of peak increased by rising ageing time.

Keywords: shape memory alloy, ageing, martensitic transformation

1.Giriş

Şekil hatırlamalı alaşımlar, Son yıllarda, şekil hatırlama etkisi ve süperelastiklik özelliklerinden dolayı oldukça fazla talep görmektedirler. Bu iki önemli özellik, tersinir martensit dönüşümü ile ilgilidir. Şekil hatırlamalı alaşımlar içinde en sık kullanılan ve talep edilen alaşım grubu NiTi dur. Bu alaşım yukarıda bahsedilen özellikleri iyi bir şekilde sergilerken, sünekliğide yüksektir. Ancak,

bakır (Cu) bazlı alaşımlara özellikle Cu-Al-Ni, Cu-Zn-Al ve Cu-Al-Mn alaşımları mühendislik uygulamalarında ucuz maliyet ve iyi şekil hatırlama etkisi ve süperelastiklik özelliklerinden dolayı talep artmaktadır [1-3]. Cu bazlı şekil hatırlamalı alaşımlara, 1960'lerden sonra oldukça fazla talep olmuştur ve NiTi alaşımlarını karşı alternatif olarak kullanılmıştır, Çünkü, iyi bir elektriksel ve termal iletkenliğe sahiptir [4].

Cu bazlı şekil hatırlamalı alaşım sistemleri, şekil hatırlamalı alaşımların pratik uygulamalarında oldukça fazla talep görmektedir. Çünkü hem ucuz hem de kolay üretilebilmektedir. Fakat bu alaşıma yüksek oranda Al katkısı tane sınırlarının güçsüzleşmesine sebep olduğu için çok kırılgan bir alaşım oluşturur. İyi bir sünekliliğe sahip Cu-Al alaşımının güçlendirilmesi için, yeni element katkılanması önemlidir [5-6]. Cu-Al alaşımlara yeni elementlerin eklenmesi, Bu alaşım grubunu daha kullanışlı ve cazip hale getirmiştir. Ancak element katkısının yanında, uygulanan ısıtma işlemi CuAl bazlı şekil hatırlamalı alaşımların performansını arttırabilir. Genellikle, robotik, otomotiv ve uçak endüstrisinde, yüksek sıcaklık şekil hatırlamalı alaşımlar önemlidir. Bu alaşımların uygulama sıcaklıkları 390 K ' in üstünde olmalıdır [7-8]. Bu çalışmada, yeni bir yüksek sıcaklık şekil hatırlamalı alaşım olan CuAlCr alaşımının dönüşüm sıcaklığına ve kristal yapısına ısıtma işlemi sıcaklığı ve ısıtma işlemi zamanının etkisi incelenecektir.

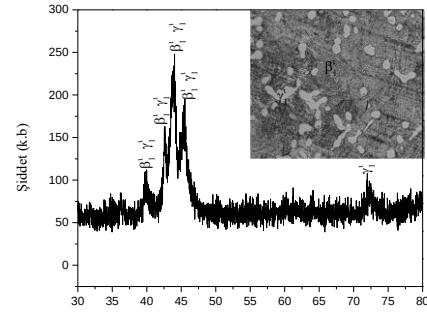
2. Materyal ve Metot

Bu Çalışmada, ark eritme fırını ile üretilen $\text{Cu}_{78}\text{Al}_{12}\text{Cr}_{10}$ (atomikçe oranda) şekil hatırlamalı alaşım üretildikten sonra 950 °C de 24 saat homejenleştirilmeye bırakıldı daha sonra bütün haldeki alaşım tuzlu buzlu suda ani soğutuldu. Üretilen ana alaşımın (Referans numune) mikroyapısı optik mikroskop ile kristal yapısı ise x ışınları ölçümleri belirlendi. Geri kalan deneysel işlemler için, $\text{Cu}_{78}\text{Al}_{12}\text{Cr}_{10}$ alaşımı, iki farklı işlem yapılacak şekilde iki gruba ayrıldı. Birinci grup alaşıma 500 °C de 1,2,3 ve 4 saat yaşlandırma uygulandı ve daha sonra alaşımın martensit dönüşüm sıcaklıklarını belirlemek için Diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) ölçümleri 20 °C/dak. Isıtma-soğutma hızıyla azot gazı atmosferinde yapıldı. Yapılan DSC ölçümleri sonucunda martensit faz dönüşümüne rastlanmadı. İkinci grup alaşıma 700 °C de 1,2,3 ve 4 saat yaşlandırma yapıldı, yaşlandırma sonucu faz dönüşümleri DSC ölçümlerinde görüldü. Faz

dönüşümü veren bu grup alaşımların x ışınları ölçümü (XRD) ölçümleri ise 0-80 ° aralığında oda sıcaklığında yapılmıştır.

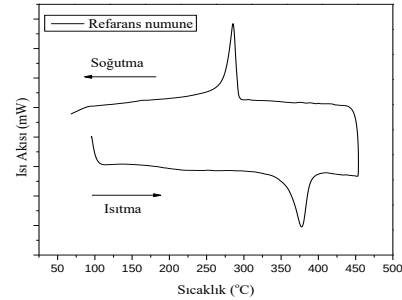
3. Bulgular

Şekil 1 de referans alaşım olan $\text{Cu}_{78}\text{Al}_{12}\text{Cr}_{10}$ sisteminin x ışınları ölçüm sonucu ve içindeki küçük pencere optik mikroskop görüntüsü görülmektedir. X ışınları pikleri literatüre göre ve JCPDS card no:28-0005 ile indisenmiştir [9-11]. Buna göre alaşım iki fazdan oluşmuştur. Bu fazlar aynı zamanda optik mikroskop fotoğrafında da net bir şekilde görülür. Bu fazların birinin kalın martensit plaka olarak bilinen β_1' fazı, diğerinin ise ince martensit plaka olarak bilinen γ_1' fazıdır. Optik mikroskop fotoğrafında da bu fazlar işaretlenmiştir. Piklerin şiddeti alaşım herhangi bir ısıtma işlem görmediği için zayıftır.

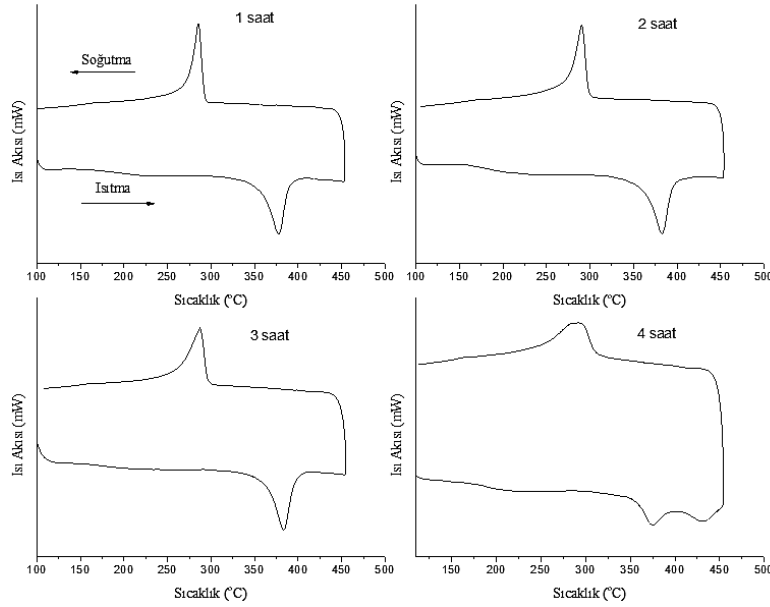


Şekil 1. Referans numune $\text{Cu}_{78}\text{Al}_{12}\text{Cr}_{10}$ şekil hatırlamalı alaşımın x ışınları grafiği ve optik mikroskop görüntüsü

Şekil 2'de Referans numunenin dönüşüm sıcaklığı değeri DSC ölçümleri ile 20 °C/dak. ısıtma hızıyla belirlendi.



Şekil 2. Referans Numune $\text{Cu}_{78}\text{Al}_{12}\text{Cr}_{10}$ şekil hatırlamalı alaşımın dönüşüm sıcaklığı eğrisi

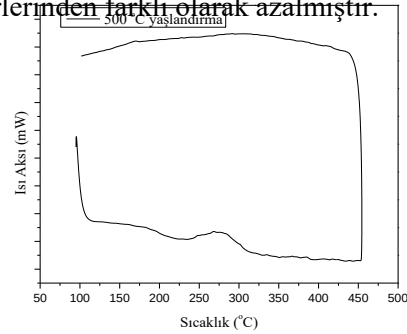


Şekil 3. 700 °C de 1,2,3 ve 4 saat yaşlandırılan CuAlCr alaşımlarının DSC eğrisi

Alaşımların dönüşüm sıcaklığı değerinden yüksek sıcaklık şekil hatırlamalı alaşım özelliği gösterdiği tespit edildi. Sonuç, tablo 1 de görülebilir. referans numunenin Kristal yapısı ve dönüşüm sıcaklığı değeri belirlendikten sonra alaşımı iki gruba ayrılıp, birinci grup alaşım 500 °C de 1,2,3 ve 4 saat yaşlandırmaya maruz bırakılırken, ikinci grup alaşımlar, 700 °C de 1,2,3 ve 4 saat yaşlandırmaya maruz bırakıldı.

Öncelikle her iki grup alaşımların diferansiyel taramalı kalorimetre ile dönüşüm sıcaklıklarına bakıldı. Ancak 500 °C de yaşlandırma yapılan alaşımda herhangi bir dönüşüm rastlanmadı (Şekil 4). Bu sıcaklıkta dönüşüm rastlanmasının çeşitli nedenleri olabilir; bunlardan birincisi, 500 °C sıcaklığının CuAl alaşımlarında ötektoid faz bölgesine yakın olması ikincisi, martensit faz içinde çökelti fazının dönüşümde etkin olması ve böylece faz etrafındaki kompozisyonun değişmesi, üçüncüsü, martensit varyantlar içinde, ara yüzeylerin olmasıdır [1,12]. 700 °C de yaşlandırmaya maruz bırakılan alaşımda dönüşüm sıcaklıkları görülmüştür. Bu nedenle çalışmanın bundan sonraki bölümünde dönüşüm sergileyen alaşım grubu olan 700 °C de yaşlandırılmış alaşımlar incelenmiştir. 700 °C de 1,2,3 ve 4 saat

yaşlandırılan alaşımların dönüşüm sıcaklıkları değeri Şekil 3 te sonuçlar ise tablo 1 de verilmiştir. Tablodaki sonuçlara göre, genel olarak, yaşlandırma zamanı ile austenit başlama dönüşüm sıcaklığı ve martensit başlama dönüşüm sıcaklığı değeri artmıştır. Alaşım 700 °C 4 saat yaşlandırıldığında diğerlerinden farklı olarak, austenit faz dönüşümü esnasında iki tane dönüşüm görülürken, martensit fazda tek dönüşüm meydana gelmiştir. Ayrıca entalpi değişimi de diğerlerinden farklı olarak azalmıştır.



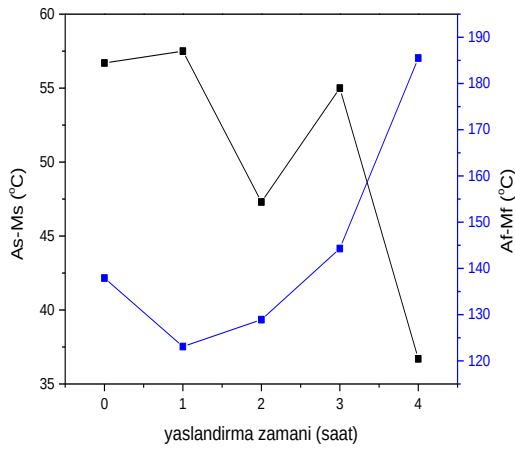
Şekil 4. 500 °C de 1 saat yaşlandırılan CuAlCr alaşımlarının DSC

Alaşımların yaşlandırmaya bağlı histerisiz grafiğine bakıldığında (şekil 5), As-Af ve Ms-Mf farklarının en yüksek görüldüğü alaşım 4 saat

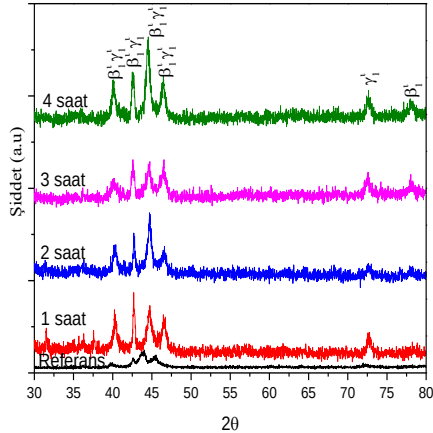
yaşlandırılmış alaşımdır. Bu farkın en az olduğu alaşım ise 2 saat yaşlandırılan alaşımdır.

Tablo 1. Cu₇₈Al₁₂Cr₁₀ alaışımının referans numunesi ile, 700 °C de 1,2,3 ve 4 saat yaşlandırılan alaşımlarının dönüşüm sıcaklıkları

Numune	As (°C)	Af (°C)	Ms (°C)	Mf (°C)	entalpi (J/g)
Referans	343.8	389.4	287.1	251.5	12.5
1 saat	350.6	390.2	293.1	267.1	11.7
2 saat	345.8	396.2	298.5	267.3	11.9
3 saat	350.8	397.8	295.8	253.5	11.1
4 saat	347.1	437.0	310.4	251.5	7.6



Şekil 5. 700 °C yaşlandırmaya maruz bırakılan CuAlCr alaışımının yaşlandırma zamanının histerisiz eğrisi



Şekil 6. CuAlCr alaışımının yaşlandırma zamanıyla kristal yapısındaki değişimi gösteren X ışınları eğrisi

Şekil 6 CuAlCr alaışımının 700 °C de 1,2,3 ve 4 saat yaşlandırma zamanına göre kristal yapısında meydana gelen değişim görülmektedir. Cu-Al ikili alaşım sistemlerinde, düzensiz β (A2) faz, 560 °C sıcaklığın üstünde kararlı durumdadır. Soğutma esnasında ise β (A2) → β₂ (B2) → β₁ (DO3) faza dönüşüm meydana gelir. Bu dönüşüm sonunda, martensit dönüşüm 9R (α'), 18R (β₁) ve 2H (γ₁') martensit fazlarda görülür. Genelde 18R (β₁) ve 2H (γ₁') martensit fazları düşük Al oranının olduğu CuAl alaşım sisteminde görülür. CuAlCr alaışımında, (β₁) ve (γ₁') martensit fazları görüldü. Yaşlandırmaya bağlı kristal yapı değişimi incelendiğinde, görülen fazların aynı kaldığı ancak piklerin şiddetinin arttığı görülür. β₁ martensit faz monoklinik kristal yapı sergilerken, γ₁' martensit faz tetragonal yapı sergiler [1,13,14].

4. Tartışma

CuAlCr yüksek sıcaklık şekil hatırlamalı alaşıma, yaşlandırma sıcaklığı ve yaşlandırma zamanının etkisi aşağıda özetlenmiştir.

DSC ölçümlerine göre 500 °C yaşlandırma sıcaklığında martensit faz dönüşümü gözlenememiştir. 700 °C yaşlandırma sıcaklığında dönüşüm vardır ve yaşlandırma zamanının değişimiyle dönüşüm sıcaklığı değeri değişmektedir. Dönüşüm sıcaklığında en ilginç değişim 4 saat yaşlandırma zamanında gerçekleşmiştir. Bu yaşlandırma zamanında ısıtma esnasında iki parçalı faza rastlanmıştır. 700 °C de farklı zamanlarda yaşlandırma yapılan CuAlCr alaışımının x ışınları ölçümlerine göre iki tane martensit faz görülmüştür. Bu martensit fazlar; γ₁' ince plakalı martensit faz, β₁' kalın plakalı martensit fazdır.

5. Kaynaklar

- Wang, C.P., Su, Y., Yang S.Y., Shi, Z., Liu, X.J. (2014), A new type of Cu–Al–Ta shape memory alloy with high martensitic transformation temperature, *Smart Mater. Struct.* **23**, 025018 (1-7)
- Silva C.A., Lima S.J. (2005) Evaluation of Mechanical Alloying to obtain Cu–Al–Nb Shape Memory Alloy, *Mater. Res.*, 8-2, 169-172

3. Soliman, H.N., Habib, N., (2014) Effect of ageing treatment on hardness of Cu-12.5 wt% Al shape memory alloy, *Indian J Phys* 88(8) 803–812
4. Camila T.A., Rodrigo E.C., Pedro C. L., Carina S.N., Erick S.M., Murilo S.S., Gabriel K.C A.2, The effect of Chromium on microstructure of CuAlNi shape memory alloy, Jun 3rd - 5th 2015, Brno, Czech Republic, EU.
5. Firstov G.S., Van Humbeeck J., Koval Y.N., (2004) High-temperature shape memory alloys Some recent developments, *Mater. Sci. Eng. A* 378 2–10
6. Na Liu, Zhou Li, Genying Xu, Ze Feng, Shu Gong, Lilong Zhu, Shuquan Liang, (2011) Effect of tellurium on machinability and mechanical property of CuAlMnZn shape memory alloy, *Mater. Sci. Eng A*, 528, 7956–7961
7. Giordana, M.F., Muñoz-Vásquez, N., Garro-González, M., Esquivel M.R., Zelaya, E., (2015) Study of the formation of Cu-24at.%Al by reactive milling, *Procedia Materials Science* 9 262 – 270
8. Dasgupta, R., Kumar A., Kumar, P., Shahadat, H., Abhishek P., (2014) Effect of alloying constituents on the martensitic phase formation in some Cu-based SMAs, *J. Mater Res. Technol.* **3**(3) 264–273
9. Huang, H.Y., Liu, J.P., Wang, Y., Liu, X.F., Xin, X., (2012) Tension–compression asymmetry of stress-induced transformations in martensitic Cu-12 wt.% Al alloys, *Mater. Lett.* **79** 51–54
10. Huang, H.Y., Wang, Y., Xin, X., (2014) Stress-induced phase transformation characteristics and its effect on the enhanced ductility in continuous columnar-grained polycrystalline Cu–12 wt % Al alloy Hai, *Mater. Sci. Eng. A* **596** 103–111
11. Yang, Y. Su, C. Wang, X. Liu, Microstructure and Properties of Cu-Al-Fe high temperature shape memory alloys, *Mater. Sci. Eng. B*, (2014), 185:67-73
12. Ahlers, M., Pelegrina, J.L., (2003) Ageing of martensite: stabilisation and ferroelasticity in Cu-based shape memory alloys, *Mater. Sci. Eng. A* **356** 298-315
13. Suresh N., U Ramamurty U., (2005) The effect of ageing on the damping properties of Cu–Al–Ni shape memory alloys, *Smart Mater. Struct.* **14** N47–N51
14. Z.D. Yakıncı, M. Kök, A.Aydogdu, Y.Aydogdu, *3rd Thermophysical and Mechanical Properties of Advanced Material* (2016) İzmir

LFSR Soru Girdisi İle PUF Tasarımının Gerçeklenmesi

Erdoğan Avaroğlu

Mersin Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü Mersin
eavaroglu@mersin.edu.tr

(Geliş/Received: 05.11.2016; Kabul/Accepted: 14.06.2017)

Özet

PUF'lar, tüm devre üretimi sırasındaki kontrol edilemeyen süreçlere dayalı olarak her bir yongaya özgü imza üreten tümdevre bileşenleridir. PUF tasarımları soru-cevap (challenge-response) ilişkisine bağlıdır. Sisteme verilen sorulara bağlı olarak cevaplar üretilir. Üretilen cevapların rasgeleliği sisteme verilen sorulara bağlıdır. Cevapların rasgeleliğini arttırmak amacıyla makalede, LFSR'den üretilen sayılar PUF'un girişlerine soru olarak verilmiştir ve kaotik işaret verilerek üretilen cevaplar ile karşılaştırılmıştır. RO tabanlı PUF tasarımı FPGA ortamında gerçekleştirilmiştir. Elde edilen cevapların istatistiksel özellikleri incelenmiş olup sonuçlar verilmiştir.

Anahtar kelimeler: PUF, Soru-cevap mekanizması, İstatistiksel testler, Ölçek indeksi.

Implementation of PUF Design with LFSR Question Input

Abstract

Physically unclonable functions – PUFs are all circuits components. During the production of all circuit, based on process can not be controlled, they produce unique signature for each chip. The PUF designs depend on the challenge-response relationship. Responses are generated depending on the challenges given to the system. In order to increase the randomness of response, Numbers generated from the LFSR are given as inputs to the PUF's challenges and compared with the responses generated by chaotic sign. The RO-based PUF design was implemented in an FPGA environment. Statistical properties of the resulting answer has been examined and successful results has been obtained.

Keywords: PUF, Challenge-response mechanism, Statistical test, Scale index

1. Giriş

Rasgele sayılar, belirli bir aralık için tanımlanmış, oluşma olasılıkları birbirine eşit ve bu sayılar arasında belirli bir ilişki olmayan sayılar olarak tanımlanabilir. Rasgele sayılar simülasyon, örnekleme, nümerik analiz, karar verme, eğlence, bilgisayar programlama ve kriptografi alanlarında çokça kullanılmıştır. Rasgele sayıların aşağıda belirtilen şu özellikleri sağlaması gerekmektedir:

- Tahmin edilememe
- Tekrar Üretilmemesi (aperiyodiklik)
- İyi istatistiksel özellikler
- Düzgün dağılım

Rasgele sayıları elde etmek amacıyla sözde rasgele sayı üreteçleri (SRSÜ) ve gerçek rasgele sayı üreteçleri (GRSÜ) olmak üzere çeşitli sayı üreteçleri geliştirilmiştir. Sözde rasgele sayı üreteçleri herhangi bir başlangıç (tohum) değeri ile belirli bir algoritmaya tabi tutularak uzun

rasgele sayı dizileri üretmişlerdir. Gerçek rasgele sayı üreteçleri gürültü kaynağı olarak gerçek fiziksel süreçleri kullanarak rasgele sayı üretirler [1]. Bu iki üreteçten özellikle gerçek rasgeleliği ve güvenliği sağlaması nedeniyle donanım tabanlı gerçek rasgele sayı üreteçleri kullanılmaktadır [1]. Ancak son yıllarda bu donanımların (cihazların) fiziksel saldırılara karşı savunmasız olduğu kanısı ortaya atılmıştır [2]. Bu nedenle bu tarz sorunların giderilmesi için PUF'lar kullanılmıştır. PUF'lar belirli bir donanıma bağlı olan rasgele fonksiyonlardır. PUF'u, daha güvenli kriptografik protokollere gizli anahtar sağlanması amacıyla kullanmak mümkündür.

Genel olarak PUF, bir fiziksel materyalin karmaşık ve değişken doğasına bağımlı olarak tutulan cevap ve soru arasındaki haritalamaya dayanan bir soru-cevap mekanizmasıdır. PUF, Şekil 1'de görüldüğü üzere m-bit soruyu alır ve n-bit cevap üretir.



Şekil 1. Genel PUF tasarımı

Eğer puf devresi farklı chipler üzerinde gerçekleştirilirse, her bir PUF aynı soru (C) girildiğinde bile benzersiz cevaplar (R) üretir.

Literatürde PUF tasarımları, elektronik ve elektronik olmayan olmak üzere 2 ana grup altında toplanmaktadır. Elektronik PUF'larda, soru-cevap mekanizması kapı gecikmeleri, transistörün eşik gerilimi gibi elektronik özelliklerine göre belirlenir. Arbiter PUF, Ring Oscillator PUF, SRAM PUF ve Butterfly PUF gibi çeşitli elektronik PUF tasarımları bulunmaktadır [3–6]. Elektronik olmayan PUF'larda ise soru-cevap mekanizması elektronik olmayan ışık ve ses gibi özellikler ile belirlenir. Optical PUF ve Acoustical PUF gibi tasarımlarda elektronik olmayan PUF tasarımlarıdır [7,8].

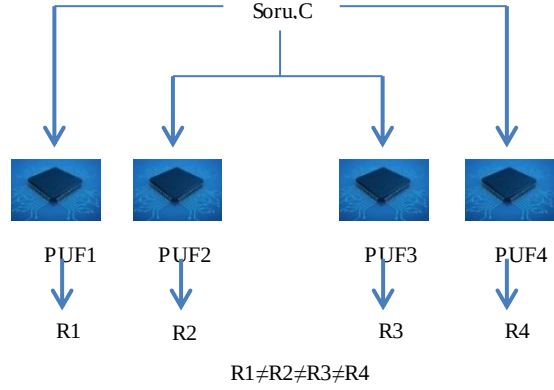
PUF'lar eşsizlik, kopyalanamama ve tahmin edilememe gibi temel özellikleri ile birçok güvenlik gereksinimini sağlarken tersine mühendislik, emülasyon ve ortadaki adam saldırısı gibi saldırılara maruz kalmaktadır. Bu amaçla önerilen sistemde, elde edilecek cevapların rasgeliğini arttırmak ve PUF'un maruz kalacağı saldırıların önüne geçmek amacıyla x^2+x+1 karakteristik denkleminde sahip LFSR yapısı soru olarak verilmiştir. Gerçekleştirilen RO tabanlı PUF devresinde her biri 3 Inverterden oluşan 128 RO kullanılmıştır. Sistemden elde edilen cevaplar bir hafıza devresine kaydedilmiştir. Elde edilen sonuçlar [9]'da yapılan çalışmada soru olarak kullanılan kaotik işaret ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca bu cevapların kriptografide kullanılabilirliğini göstermek için istatistiksel test (NIST), ölçek index (scale index), istatistiksel karmaşıklık ölçüsü (statistical complexity measure (SCM)) ve oto korelasyon test sonuçları elde edilmiştir.

Makalenin geri kalan kısmı aşağıdaki gibi organize edilmiştir. 2. Bölümde PUF devrelerinin temel özellikleri verilmiştir. 3. Bölümde önerilen sistemin yapısı ve gerçekleştirilmesi sunulmuştur. 4. Bölümde istatistiksel test (NIST), ölçek index, SCM ve oto korelasyon açıklamaları ve elde

edilen sonuçlar verilmiştir. Son bölümde sonuçlar tartışılmıştır.

2. Fiziksel Klonlanamaz Fonksiyonlar

PUF, Şekil 3 'te görüldüğü üzere bir fiziksel materyalin karmaşık ve değişken doğasına bağlı sisteme girilen m bit challenge ile eşsiz n-bit responselar üretebilen bir yapıya sahiptir.



Şekil 2. Genel PUF tasarımının çalışma prensibi

Burada, C her biri ile m-bit ikili giriştir. R1, R2, R3 ve R4 cevapları da n bit ikili dizidir.

PUF'ların eşsizlik, kopyalanamama ve tahmin edilememe gibi temel özellikleri mevcuttur. Eşsizlik özelliği, bir PUF'un farklı devreler üzerinde aynı sorular ile farklı cevaplar üretmesidir. PUF'un en temel özelliği olan kopyalanamama ise birbirinin aynı iki devrenin yapılmasının mümkün olmadığı anlamına gelmektedir. Bir diğer önemli özellik ise PUF cevaplarının tahmin edilemez olmasıdır. PUF'un bu kaliteli özelliklerinden dolayı kimlik doğrulama, kriptografik anahtar üretimi ve fikri mülkiyet koruma gibi uygulamalar için gelecek vaat eden bir çözüm haline gelmiştir. PUF'lar bu temel özellikleri ile birçok güvenlik gereksinimi sağlarken tersine mühendislik, emülasyon ve ortadaki adam saldırıları gibi güvenlik açıklarından muzdarip olabilirler [10]. Tersine mühendislik saldırıları ile PUF klonlanmaya çalışılmaktadır. Emülasyon saldırıları, tüm olası soru-cevap çiftlerini (CRP) depolamaya çalışır. Ortadaki adam saldırıları, PUF ve kimlik doğrulama sunucusu arasındaki CRP bilgi değişimini çalmak ister.

Bu güvenlik açıklarının önüne geçilmesi amacıyla oldukça büyük cevaplar elde etmek gereklidir. Çünkü;

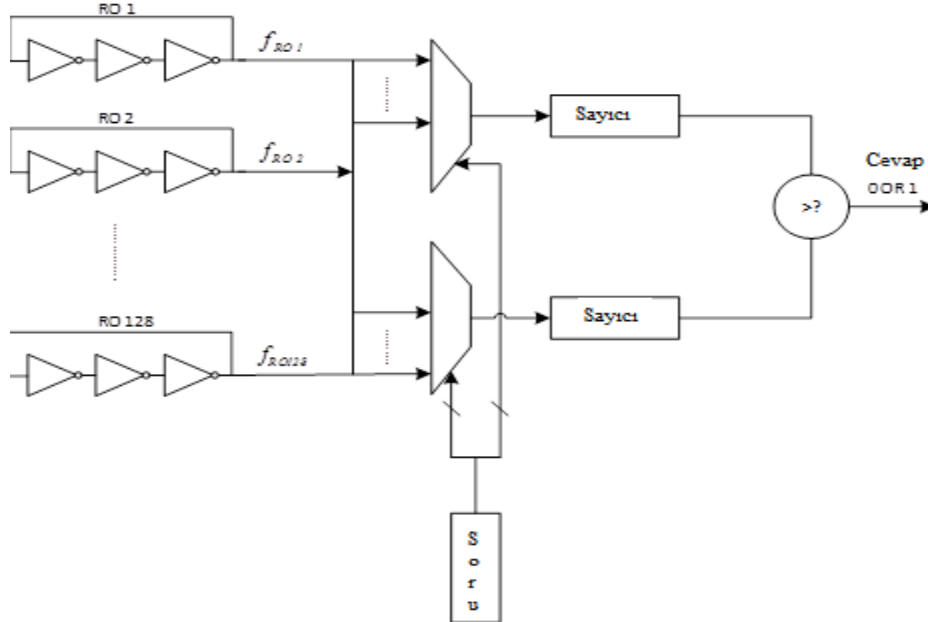
1. PUF cevaplarının büyük kümesi uzun şifreleme anahtarlarına yol açar, ki güçlü şifreleme sunabilir.
2. Bir cihaz kimlik doğrulama sürecinde, PUF CRPs cihaz kimlik doğrulaması ve kimlik doğrulama makamı arasında değiştirilebilir (değiş tokuş yapılabilir). Çünkü CRPs genel bilgidir ve transfer işlemi güvenli olmayan bir kanal üzerinden gerçekleşmesi nedeniyle bir saldırgan bu bilgiyi yakalayabilir ve değiştirebilir. Bu gibi tekrar saldırılarının önüne geçmek amacıyla CRP bir kereden fazla kullanılmamalıdır. Ancak bu büyük CRP kümeleri oluşturmayı gerektirir.
3. PUF'lar çevresel değişiklikler ve gürültü etkilerinden dolayı hatalı veya kararsız oldukları için PUF cevap bitlerinin sayısı güvenilir biçimde kullanılamaz. Bu hatayı telafi etmek için ek cevap üretmek gerekir.

Büyük cevaplar elde etmek için rasgele seçilen sorular kullanılmalıdır. Önerilen sistemde doğrusal olmayan LFSR soru yapısı kullanılarak cevap üretimi gerçekleştirilmiştir.

3. Önerilen Sistemin Yapısı ve Gerçekleştirilmesi

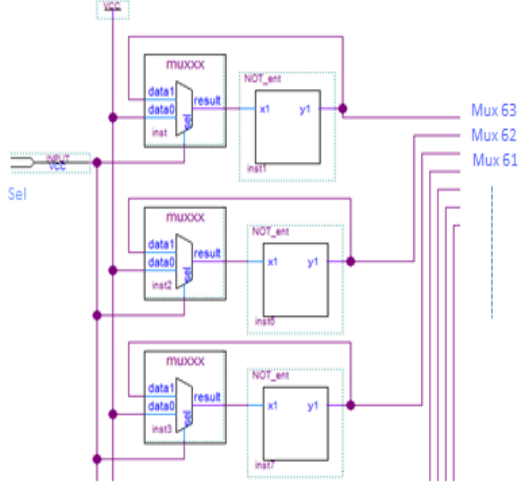
RO'lerin FPGA'de uygulanmasının kolay olması ve TRNG sistemlerinde kullanılan RO tabanlı rasgele sayı üreteçleri ile entegre edilebilmesi nedeniyle önerilen sistem Altera'nın EP4CE115F29C7 tabanlı FPGA bordunda gerçekleştirilmiştir.

Şekil 3'te genel RO tabanlı PUF tasarımı verilmiştir. Bu tasarımda her biri 3 inverter içeren 128 RO kullanılmıştır. RO lerin çıktıları 64x1 'lik birer Mux devresine giriş olarak verilmiştir. Sistemde kullanılan her bir RO VHDL dili ile dataflow ve şematik tasarım yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3. Genel RO tabanlı PUF Tasarımı

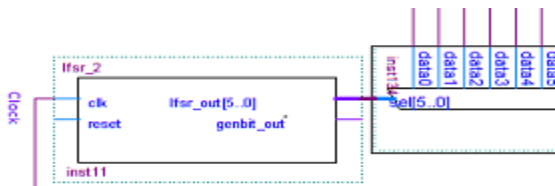
Şekil 4'te RO yapısını göstermektedir. Şekil 4'te inverter çıkışı sürekli olarak logic 0 seviyesindedir. RO tarafından rasgele işaretin elde edilmesi için fiziki ortamdan bir uyartım işaretinin (sel=1) verilmesi ile RO çıkışı elde edilmektedir.



Şekil 4. RO tasarımı

Herbir RO'den elde edilen çıkışlar birer mux devresine girilmektedir. Mux devresine giriş olarak verilen RO'lerden hangisinin çıkışa aktarılacağı soru tarafından belirlenmektedir. Her bir MUX çıkışı bir sayıcıya girilerek sayıcıların ileri doğru sayması gerçekleştirilmektedir.

Bu makalede doğrusal olmayan 6 bitlik LFSR yapısı kullanılarak Soru devreleri gerçekleştirilmiştir. Kullanılan LFSR x^2+x+1 karakteristik denklemine sahiptir. Sayıcılardan frekansı büyük olan cevap (Rasgele sayı) olarak kullanıldı. Elde edilen her bir rasgele sayının istatistiksel testlerini gerçekleştirmek hafıza birimine 50 mHz'lik örnekleme ile kaydedilmiştir. Hafıza 1'er bitlik değer saklayabilen 65535 adresten oluşmaktadır. Sayının hangi adrese kaydedileceğini belirlemek için ileri sayan bir sayıcı kullanılmıştır. Kullanılan LFSR x^2+x+1 karakteristik denklemine sahip olup Şekil 5'de gösterilmiştir.



Şekil 5. LFSR soru

[9]'da yapılan çalışmada ise, logistik harita tarafından rasgele soru işaretleri üretilmesi için floating point sayı sisteminde işlem yapabilen çarpma, çıkarma devreleri kullanılmıştır. Logistik haritanın sistem parametresi $r=3.99$ tohum değeri $X_0 = 0.2$ seçilmiştir. Üretilen bu sayıların 0.5'ten büyük olması durumunda 1 aksi durumda 0 sayısı üretilmiştir. Bu sayılara karşılık üretilen bit dizisi 1, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 1, 0 ... olmuştur. Logistik haritadan üretilen her 6 sayı {110000, 110011, 110010, ...} soru girişlerine verilmiştir.

4. Deneysel Sonuçlar

Sistemden üretilen cevaplar kriptografik sistemlerde anahtar üretimi için gerekli olan rasgele sayı olarak kullanılacaktır. Elde edilen cevapların rasgeleliliğini arttırmak için 6 bitlik LFSR sisteme soru olarak verilmiştir. Soru olarak kullanılan LFSR ile [9]'da soru olarak kullanılan kaotik işaret ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca önerilen sistemin kriptografik uygulamalarda güvenli olarak kullanılabilmesi için rasgelelik testlerine tabi tutulması gerekmektedir. Üretilen sayıların rasgeleliliğini analiz etmek için birçok test suiti geliştirilmiştir. Bunların başlıcaları NIST istatistiksel test, SCM ve oto korelasyon testleri olup elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

4.1. NIST istatistiksel test

Rasgele sayı üreteçleri tarafından üretilen uzun ikili bit dizilerinin rasgeleliliğini ölçmek için geliştirilmiştir. 16 test içeren istatistiksel bir pakettir. Bu testler dizi içerisindeki rasgele olmayan durumlara odaklanır [11]. NIST 800.22 test suiteine göre istatistiki test sonuçları aşağıdaki Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Önerilen RO-PUF sisteminden elde edilen rasgele sayıların istatistiki test sonuçları

Test	LFSR	Lojistik Harita	Sonuç
Frekans	0.254	0.757	Başarılı
Blok Frekans Test	0.999	0.135	Başarılı
Akış Test	0.026	0.801	Başarılı
En Uzun Birler Test	0.106	0.497	Başarılı
İkili Matris RankıTest	0.707	0.336	Başarılı
Ayrık Fourier Test	0.350	0.501	Başarılı
Örtüşmeyen Şablon Eşleştirme Testi	0.213	0.698	Başarılı
Örtüşen Şablon Eşleştirme Testi	0.044	0.630	Başarılı
Maurer Test	0.300	0.435	Başarılı
Doğrusal Karmaşıklık Test	0.097	0.644	Başarılı
Seri Test	0.365	0.444 0.617	Başarılı
Yaklaşık Entropi Test	0.130	0.949	Başarılı
Kümülatif Toplam Test	0.500	0.880	Başarılı

4.2. Ölçek index yöntemi

Bir sinyalin veya üretilen sayı dizilerinin non-periyodiklik derecesi hakkında bilgi edinmemizi sağlayan scale index tekniği Benitez tarafından önerilmiştir [12].Kullanılan teknik, Sürekli Dalgacık Dönüşümü (Continous Wavelet Transform-CWT) ve dalgacık çoklu çözünürlük (wavelet multi resolution) analizine dayanmaktadır. Sistemin periyodiklik derecesini belirlemek için kullanılan yöntem aşağıda verilmiştir [13]. Ölçek s ve u zamanındaki f 'in

Sürekli Dalgacık Dönüşümü (CWT) ve scalogram Denklem 1 ve 2'teki gibidir.

$$Wf(u, s) := \langle f, \psi_{u,s} \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi_{u,s}^*(t) dt \quad (1)$$

$$S(s) := \|Wf(u, s)\| = \left(\int_{-\infty}^{+\infty} |Wf(u, s)|^2 du \right) \quad (2)$$

$S(s)$ bir scale s 'deki f 'in Sürekli Dalgacık Dönüşümünün enerjisidir. Bir ölçek s 'deki f 'in innerscalogramı denklem 3'deki gibidir.

$$S^{inner}(s) := \|Wf(u, s)\|_{j(s)} = \left(\int_{c(s)}^{d(s)} |Wf(u, s)|^2 du \right)^2 \quad (3)$$

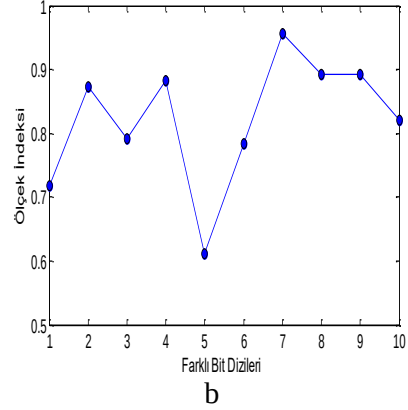
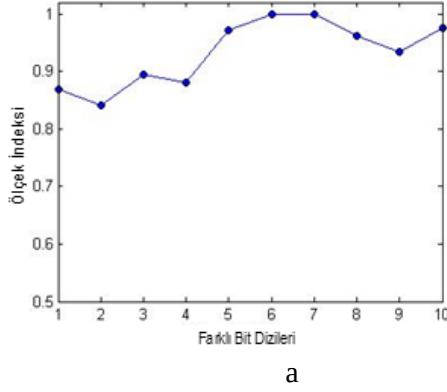
$J(s) = [c(s), d(s)] \subseteq I$, I 'da maksimum alt aralığı göstermektedir. $\psi_{u,s}$ 'nin katkısı tüm $u \in j(s)$ için I 'da yer alır. $J(s)$ in uzunluğu ile ilgili olarak, ölçek s 'e bağlıdır, böylece farklı ölçeklerde iç scalogram değerleri karşılaştırılmaz. Normalize edilmiş S^{inner} denklem 4'deki gibidir.

$$\bar{S}^{inner}(s) = \frac{S^{inner}(s)}{(d(s) - c(s))^2} \quad (4)$$

$[s_0, s_1]$ aralığındaki f 'in ölçek indeksi denklem 5'deki gibidir.

$$i_{scale} := \frac{S(s_{min})}{S(s_{max})} \quad (5)$$

Ölçek indeks değeri i_{scale} ; $0 \leq i_{scale} \leq 1$ aralığında olmalıdır. Üretilen sistemden elde edilen i_{scale} değeri 0 veya 0'a yakın olursa sistem periyodik, 1 veya 1'e yakın olursa sistem non-periyodik olacaktır. Şekil6a.'da lojistik harita ve Şekil6b.'de ise LFSR'den elde edilen cevapların ölçek indeks sonuçları verilmiştir.



Şekil 6. a) Lojistik harita b) LFSR

4.3. Oto korelasyon test

Korelasyon, iki yada daha fazla değişken arasındaki doğrusal ilişkiyi gösterir. +1 ve -1 arasında değer alır. Eğer 0 veya 0 a yakınsa bu değişkenler arasında doğrusal ilişki yoktur. Bu testin amacı da üretilen bit dizisi b_i ile onun kaydırılmış versiyonu arasındaki korelasyonu kontrol etmektir. d değerini sabit tamsayı ve $1 \leq d \leq (n/2)$ olarak alalım. Testin matematiksel tanımlamaları Denklem 6 ve 7’de verilmiştir [14].

$$A(d) = \sum_{i=0}^{n-d-1} b_i \oplus b_{i+d} \quad (6)$$

Burada $\oplus$ XOR operatörü ve n bit dizisi uzunluğudur. Denklem 7’de tanımlanmıştır.

$$X_5 = \frac{2[A(d) - (n-d)/2]}{\sqrt{n-d}} \quad (7)$$

Eğer $\{b_i\}$ gerçek rasgele dizi ve $n \rightarrow \infty$ ise, bu rasgele değişken normal dağılıma $N(0,1)$ sahiptir. $\alpha=0.05$ alarak, eğer $|X_5| < 1.6449$ ise test başarılıdır [14]. Önerilen PRNG sisteminden elde edilen korelasyon test sonuçları Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Oto korelasyon test sonuçları				
	d	LFSR	Lojistik Harita	Sonuç
Oto Korelasyon	8	1.156	0.776	Başarılı
	10	0.572	1.300	Başarılı
	13	0.652	0.560	Başarılı

5. Sonuç

Bu çalışmada, RO PUF tasarımından elde edilen cevap’ların rasgeleliliğini arttırmak ve PUF’un maruz kalacağı saldırıların önüne geçmek amacıyla non-periyodik yapıya sahip LFSR’den elde edilen soru yapısı kullanıldı ve kaotik işaret kullanılan soru yapısıyla karşılaştırma işlemi yapıldı. Her iki sistemden elde edilen cevapların NIST testlerinin tamamını başarı ile geçtiği ve otokorelasyon sonuçlarında başarılı olduğu gözlemlenmiştir. Ancak ölçek indeks yöntemi sonuçlarına bakıldığında soru olarak kaotik işaretler kullanılarak elde edilen cevapların daha periyodik olduğu gözlemlenmiştir. Önerilen sistemde üretilen rasgele sayılar en az sayıda inverter (3 inverter) içeren 128 RO ile PUF tasarımı gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar herhangi bir son işleme tabi tutulmadan istatistiki testleri başarı ile geçmiştir. Sonuç olarak, elde edilen tüm test sonuçları değerlendirildiğinde önerilen sistemin de kriptografik sistemlerde güvenli anahtar üretiminde kullanılabileceği gösterilmiştir.

6. Kaynaklar

1. Koç, Ç. K. (2009). About Cryptographic Engineering, in Cryptographic Engineering, Ed. Springer US, 1–4.
2. Lee, J. W., Lim, D., Gassend, B., Suh, G. E., van Dijk, M. and Devadas, S. (2004). A technique to build a secret key in integrated circuits for identification and authentication applications, in 2004 Symposium on VLSI Circuits, Digest of Technical Papers, 176–179.

3. Gassend, B. (2003). Physical Random Functions, Master, MIT, MA, USA
4. Guajardo, J., Kumar, S. S., Schrijen, G.-J. and Tuyls, P. (2007). FPGA Intrinsic PUFs and Their Use for IP Protection, in Cryptographic Hardware and Embedded Systems - CHES 2007, P. Paillier and I. Verbauwhede, Eds. Springer Berlin Heidelberg, 63–80.
5. Kumar, S. S., Guajardo, J., Maes, R., Schrijen, G.-J. and Tuyls, P. (2008). Extended abstract: The butterfly PUF protecting IP on every FPGA, in IEEE International Workshop on Hardware-Oriented Security and Trust, HOST 2008, 67–70.
6. Pappu, R. S. (2001). Physical one-way functions, Phd., Massachusetts Institute of Technology.
7. Pappu, R., Recht, B., Taylor, J. and Gershenfeld, N. (2002). Physical One-Way Functions, Science, vol. 297, no. 5589, 2026–2030
8. Vrijaldenhoven, S., (2004) Acoustical Physical Uncloneable Functions, Master, Department of Mathematics and Computing Science, Technische Universiteit Eindhoven.
9. Tuncer, T. (2016). The implementation of chaos-based PUF designs in field programmable gate array, Nonlinear Dyn., vol. 86, no. 2, 975–986
10. Majzoobi, M., Koushanfar, F. and Potkonjak, M. (2009). Techniques for Design and Implementation of Secure Reconfigurable PUFs, ACM Trans Reconfigurable Technol Syst, vol. 2, no. 1, 5:1–5:33
11. Rukhin, A., Soto, J., Nechvatal, J., Smid, M. and Banks, D. (2001). A statistical test suite for random and pseudorandom number generators for statistical applications, NIST Spec. Publ. Comput. Secur.
12. Benítez, R., Bolós, V. J. and Ramírez, M. E. (2010). A wavelet-based tool for studying non-periodicity, Comput. Math. Appl., vol. 60, no. 3, 634–641
13. Akhshani, A., Akhavan, A., Mobarak, A., Lim, S.-C. and Hassan, Z. (2014). Pseudo random number generator based on quantum chaotic map, Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simul., vol. 19, no. 1, 101–111
14. Menezes, A. J., van Oorschot, P. C. and Vanstone, S. A. (1996). Handbook of Applied Cryptography, 1 edition. Boca Raton: CRC Press

Linyit Yakılan Bir Güç Üretim İstasyonunun Gaz Türbininin İkinci Kanun Analizi

Erdem IŞIK ^{1*}, Hasan Kaan BERENT, Mehmet GÖK

¹ Munzur Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, Tunceli

*e-posta: erdem@munzur.edu.tr

(Geliş/Received: 29.11.2016; Kabul/Accepted: 06.06.2017)

Özet

Türkiye'nin linyit rezervlerinin büyük çoğunluğu, kalori değerinin düşük olması sebebiyle ancak termik santral yakıtı olarak kullanılmaya elverişlidir. Bununla beraber, Türkiye'de ki en yaygın enerji kaynaklarından olan linyit rezervlerinin uzun vadeli kullanımı; ucuz, temiz, verimli ve güvenilir yakma teknolojilerinin kullanımı ile mümkündür. Mühendislik sistemlerinde ekserji analizinin uygulanması; sistemlerin ilk tasarımı ve ekonomik analizlerinin yapılması açısından önemli veriler sunmaktadır. Analiz sonuçlarının değerlendirilmesi ile yapılan yorum ve enerji kayıplarının yeri, büyüklüğü ve nedenleri saptanabilmekte, dolayısıyla sistemlerin verimleri arttırılabilmektedir. Çalışmamızda linyit yakıtını kullanan mevcut termik santraline, termodinamiğin ikinci kanununa göre analiz yapılmıştır. Çalışmada sistemi oluşturan santral elemanlarından türbin için faydalı güç, tersinir güç ve tersinmezlik miktarları tespit edilmiş ve sistemin genel verimi hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar ve değerlendirmelerde, termik santrallerin kurulmasında ve işletilmesinde, tasarım ve ekonomi açısından önemli veriler bulundurmaktadır. Böylece günümüzde büyük önem taşıyan, enerji tasarrufu ve enerjinin en verimli şekilde kullanılması sağlanabilecektir.

Anahtar Kelimeler: Termodinamik analiz, Ekserji, Buhar çevrim santrali.

Second Law Analysis of A Gas Turbine of A Lignite-Fired Power Station

Abstract

The most of the lignite reserves of Turkey are convenient for using in thermal power plants due to its low calorific value. Therewithal, the long-term use of lignite reserves, which is one of the most common energy sources in Turkey, is only possible by using cheap, clean, efficient and reliable combustion technologies. Application of exergy analysis in engineering systems offers important data for first-setup of systems and their economic analysis. By evaluating and interpreting the analysis results, the locations, the amount and the causes of energy losses can be determined and thereby, their efficiency may be increased. In this study, an analysis regarding the second law of thermodynamics was performed for a thermal power plant which uses lignite as combustion fuel. For the turbine which is one of the components of power plant, the useful power, reversible power and the amount of irreversibility have been determined and the general efficiencies of the system have been calculated. In the results and evaluations obtained, there are important data about the set-up, operation, design and economy of thermal power plants. Thus, the most efficient use of energy and energy save which are very important nowadays could be provided.

Keywords: Thermodynamically analysis, Exergy, Vapor cycle Power plant.

1. Giriş

Son yıllarda enerji talebi giderek artmakta ve doğal enerji kaynakları aşırı derecede tüketilmektedir. Artan nüfus ve sanayileşmeden kaynaklanan enerji gereksinimi karşılanamamakta, enerji üretimi ve tüketimi arasındaki açık hızla büyümektedir. Toplumlar artan enerji sorunlarını ya enerji kaynaklarını minimum seviyede tüketerek ya da yeni enerji

kaynaklarını keşfederek çözebileceklerdir. Diğer taraftan geleneksel enerji üretim yöntemleri bugün çevre kirliliğinin önemli nedenlerinden birisidir [1]. Dünyanın enerji kaynaklarının sınırlı olması gerçeğinin giderek daha geniş kesimlerce anlaşılması, hükümetleri enerji politikalarını tekrar gözden geçirmeye ve enerji savurganlığını önlemeye yöneltmiştir. Son zamanlarda birçok tersinmez sanayi işletmesinin verimliliğinin tespitinde termodinamik

analizlerin kullanılması büyük önem kazanmıştır.

Termodinamiğin birinci yasası enerjinin niceliği ile ilgilidir, enerjinin var veya yok edilmeyeceğini vurgular. Bu yasa, bir hal değişimi sırasında enerjinin hesabını tutmak için bir yöntem ortaya koyar ve uygulamada mühendis için zorluk çıkarmaz. Termodinamiğin ikinci yasası ise enerjinin niteliği ile ilgilidir ve bir hal değişimi sırasında enerjinin niteliğinin azalması, entropi üretimi, iş yapma olanağının değerlendirilmemesi bu yasanın inceleme alanı içindedir [2].

Ekserji, termodinamik bir sistemin ihtiva ettiği potansiyel enerjisinin, herhangi bir referans haline göre kullanılabilirliğinin bir göstergesidir. Sistem enerji elde ettiğinde ise ekserji entropiden arındırılmış enerji olarak tanımlanır. Kişi başına enerji tüketimi Türkiye için 1990'da 945 KEP'ten (kilogram eşdeğer petrol), 2016'da 1551 KEP'e yükselmiştir. Türkiye, mevcut hali ile dünya nüfusunda %1,1'lik, enerji tüketiminde ise %0.86'lık bir paya sahiptir. Sırasıyla Tablo 1 ve 2'de Türkiye için birincil enerji üretimi ve genel enerji arzı verilmiştir.

Türkiye'nin olası petrol ve doğalgaz krizlerine müdahale gücünün olmaması enerji kaynağının temininde güvenilirlik gerekliliğini ön plana çıkarmaktadır. Bundan dolayı, ekolojik kültürel kalkınmaya son derece olumlu yönde etkilemesi ve işletilmesi nedeniyle ortaya çıkan katma değer, elektrik enerjisi üretiminde kWh başına ucuz hammadde olması ve emniyetli taşınması gibi faktörler, kömürü Türkiye'nin en önemli fosil enerji kaynağı haline getirmektedir [3].

Tablo 1. Türkiye için birincil enerji üretimi değerleri

	1990	Pay %	2000	Pay %	2001	Pay %
Petrol	23901	45,1	32297	39,7	30936	40,7
Linyit	9765	18,4	13219	16,3	11929	15,7
Taş Kömürü	6150	11,6	9983	12,3	7060	9,3
Doğalgaz	3110	5,9	13729	16,9	14868	19,6
Hidro	1991	3,8	2656	3,3	2065	2,7
Ticari olmayan	7208	13,6	6457	7,9	6211	8,2
Diğer	0.862	1,6	2910	3,6	2883	3,8
Toplam	52987	100,0	81251	100,0	75952	100,0

Tablo 2. Türkiye için Genel Enerji Arzı (MTEP)

Yıllar	Taş Kömürü Bin Ton	Linyit Bin Ton	Asfaltit Bin Ton	Doğalgaz Milyon m ³	Petrol Bin Ton	Hidro GWh	Biokütle Bin Ton	Güneş Bin TEP
1995	8548	52405	66	6937	27918	35541	25139	143
1996	10892	54591	34	8114	29604	40475	25040	159
1997	12537	59474	29	10072	29176	39816	24949	179
1998	13146	64504	23	10648	29022	42229	24770	210
1999	11362	64049	29	12902	28862	34678	23826	236
2000	15525	64384	22	15086	31072	30879	22919	262
2001	11176	61010	31	16339	29661	24010	22053	287
2002	18330	52039	5	17694	29776	33684	21223	318
2003	17535	46051	336	21374	30669	35330	20430	350
2004	18904	44823	722	22446	31729	46084	19671	375
2005	19230	42342	743	22725	30749	44431	17541	387

Enerji üretimi 1990'da 25,48 MTEP (milyon eşdeğer petrol) düzeyinde iken, 2001 yılında 25,17 MTEP olarak gerçekleşmiştir. Petrol ve doğalgaz üretimi nispeten az olup, esas yerli enerji kaynağını çoğu linyit olmak üzere kömür ve hidroelektrik oluşturmaktadır. 2001 yılındaki birincil enerji üretiminin %51,1'i kömürden, %11,7'si petrol ve doğalgazdan, %8,2'si hidroden, %24,7'si ise ticari olmayan kaynaklardan sağlanmıştır. Net enerji ithalatı 1973-1995 arasında yılda yaklaşık %7, 1990-2000 yılları arasında da %6 artmış; 1990'da 30,94 MTEP iken, 2000'de 56,28 MTEP'e ulaşmıştır. Özetle Türkiye, enerji kaynakları açısından açıkça görüldüğü gibi ithalatçı bir ülkedir. 2000 yılı itibarıyla yılda tükettiği yaklaşık 80 milyon ton kömürün %85'ini kendisi imal ederken, 31 milyon ton ham petrolün %91'ini, 15,1 milyar metreküp doğalgazın %96'sını ithal etmiştir.

Dünyanın ileri gelen ülkeleri arasında yer alacak bir gelişmişlik ve refah düzeyini sağlamak üzere Türkiye'nin; serbest, şeffaf ve istikrarlı piyasa koşulları içinde ulusal kaynaklarına önem veren, bu kaynakların aranmasında ve istenen kaliteyle, güvenli ve ekonomik olarak üretiminde ileri teknolojileri kullanan ve geliştirebilen, gereksinim duyduğu enerjiyi; güvenilir, ekonomik, verimli ve çevreye duyarlı teknolojilerle üreten, ileten, depolayan ve kullanan, uluslararası enerji pazarında

yarışabilecek enerji teknolojileri geliştirebilen ve uluslararası enerji yatırımlarında etkili rol alabilen bir ülke olması gerekmektedir [4].

Bu çalışmaya paralel olarak 2003 yılında Atatürk Üniversitesi ısıtma merkezinin enerji ve ekserji analizi yapılmış olup, çalışmada dört kazan, elliden fazla eşanjör dairesi, 11.988 metre uzunluğunda kızgın su dağıtım hatları bulunan ve yılda yaklaşık on bin ton özel kalorifer yakıtı tüketen Atatürk Üniversitesinin ısıtma merkezinin enerji ve ekserji analizi yapılmıştır. Analiz sonucunda kazan enerji ve ekserji verimleri sırası ile %99,41 ve %24,81 olarak bulunurken tüm sistemin enerji verimi %83, ekserji verimi ise %10,8 olarak bulunmuştur. Sonuç olarak, gerek sistemin otomatik kontrolünde gerekse binalarda yapılacak iyileştirmeler ile yılda yaklaşık 3000 ton yakıt tasarrufu edilebileceği tespit edilmiştir [5]. Ünver [6], ise çevre sıcaklığının bir kombine çevrim güç santralinin performansına etkisini incelemiştir. Çalışmasında, doğalgaz yakıtlı bir kombine çevrim güç santralinin çevre sıcaklığına bağlı olarak performans parametrelerinin değişimi ve değişim miktarları Termodinamiğin I. ve II. kanunlarını kullanarak analiz etmiştir. Sistemin I. ve II. kanun verimlerinin, çevre sıcaklığının 42°C artışında sırasıyla %4 ve %5 oranında azaldığı hesaplanmıştır. Atmosferik hava sıcaklığındaki artışın sistemin genel verimini olumsuz olarak etkilediği, sıcaklığın 42°C artması santral net güç çıkışını %22 oranında azalttığı ve özgül yakıt sarfiyatını %9 oranında arttırdığı görülmüştür. Sonuç olarak çevre sıcaklığının artışıyla oluşan performans düşüşüne karşı gerekli tedbirler alınarak ya da yeni teknolojiler geliştirerek kombine çevrim santrallerinin iyileştirilebileceği kanısına varmıştır. Coşkun [7] ise Türkiye’de faaliyet gösteren Çayırhan termik santralinin enerji ve ekserji analizlerini yapmıştır. Termik santralin her bir ünitesinin giriş ve çıkış noktalarının termodinamik özelliklerini EES paket programı yardımıyla belirlenmiştir. Elde edilen termodinamik özellikler yardımıyla termik santralin ısı ve ikinci yasa verimleri sırasıyla %38 ve %53 olarak bulunmuştur. Sonuç olarak, ekserji kaybının büyük yoğunluğunun kazanda oluşmasından dolayı kazanda iyileştirilmeler yaparak, verimin artırılması için iyileştirmeler

sunmuştur. Akgül [8] ise dört kademeli pistonlu tip bir CO₂ kompresör sisteminin enerji ve ekserji analizini yapmıştır. Bu analizler sonucunda sistemin verimlilik açısından iyi durumda olduğu ancak tersinmezlikleri daha da azaltmanın ve verimliliği arttırmanın imkan dahilinde olduğunu ifade etmiştir. Ilık [9] ise trijenerasyon sistemlerinin enerji ve ekserji analizi altında çalışma yapmıştır. Bu çalışmada doğalgaz yakıtı ile çalışan bir trijenerasyon sisteminin enerji ve ekserji analizi yapılmıştır. Kojenerasyon sisteminin termodinamik analizi sonucunda en fazla ekserji kaybının yaşandığı üniteler %32 ile yoğunlaştırıcı, %25 ile yanma odası ve %23 ile atık ısı kazanında olduğu belirtilmiştir. Absorpsiyonlu soğutma sisteminde ise en fazla ekserji kaybının %37 ile kondenser, %31 ile jeneratör ve %18 ile buharlaştırıcıda olduğu tespit edilmiştir. Öncelikle en fazla ekserji kaybının yaşandığı ünitelerde iyileştirme yapılması gerektiği öngörülmüştür. Çalışmada son olarak kayıpların nedenleri belirtilmiş ve olası çözüm yolları sunulmuştur [9]. Goyal ve arkadaşları [10], Hindistan’da ki 1260 MW gücünde bir termik santralinin 210 MW’lık kısmına ekserji analizi yapmışlardır. Bu çalışmada Hindistan’da bulunan Singh Süper Termik Santrali’nin 210 MW’lık biriminin ekserji analizi sunulmuştur. Çevrim döngüsündeki çeşitli enerji ve ekserji kütle noktaları kullanılarak, enerji ve ekserji denklemleri hesaplanmıştır. Sistemin buhar kazanı, türbin ve kondensatör gibi ana bileşenleri Termodinamiğin I. ve II. kanunlarına göre değerlendirilmiştir. Analizler sonucunda en fazla ekserji kaybının buhar kazanında meydana gelmesine rağmen en çok enerji kaybının kondenserde olduğu ortaya konmuştur. Abdalisouon ve arkadaşları [11], gelişmiş kombin çevrim enerji santrallerinin termodinamik performansında önemli gelişmeler elde etmek için ağırlıklı olarak daha iyi verime sahip bir gaz türbin sisteminin geliştirilmesi gerektiğini savunmuşlardır. Bu çalışmada, eksergoekonomik analiz tekniği kullanılarak Termal Kombin Çevrim Gaz Türbini (CCGT) elektrik santralini iyileştirmek için kazan sisteminde seçilen parametrelerin etkisi değerlendirilmiştir. Bu veriler, İran’da bulunan Tahran-İran Damavand santralinden alınmıştır.

İki farklı amaç fonksiyonu önerilmiştir. İlk öneride birim başına üretim maliyeti toplam maliyete göre %2 daha düşük bulunmuştur. İkinci çalışmada ise ekserji verimliliğinin temel duruma göre %4 daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Sonuç olarak seçilen karar değişkenlerinin ekserji analizi ve maliyet etkinliği iyileştirmeleri için uygun sonuçlar ortaya koyduğu gözlenmiştir. Bu çalışmada ise İsen Sugözü Termik Santrali'nde bulunan 3 farklı türbine yapılan ekserji analizi ile iyileştirmeler yapılabileceği ifade edilmektedir.

2. Materyal ve Metod

Sürekli akışlı sürekli açık (SASA) sistemlerde, sisteme bir adet giriş-çıkış olabileceği gibi birden çok kütle giriş-çıkışı da olabilmektedir. Giriş hali g, çıkış hali ç alt indisleri ile ifade edilirse aşağıdaki süreklilik denklemi elde edilir.

$$\Sigma \dot{m}_\chi - \Sigma \dot{m}_g = 0$$

$$\Sigma \dot{m}_\chi = \Sigma \dot{m}_g \quad (1)$$

Sisteme birden çok giriş ve çıkışın olabileceği, ayrıca sistemin P_0 basıncında ve T_0 sıcaklığındaki çevre ortamla ısı alışverişinde bulunabileceği kabul edilirse;

$$\dot{Q} - \dot{W} = \Sigma \dot{m}_\chi \cdot \theta_\chi - \Sigma \dot{m}_g \cdot \theta_g \quad (2)$$

$$\dot{Q}_A - \dot{W}_A = \Sigma \dot{m}_\chi \left(h_\chi + \frac{v_\chi^2}{2} + g \cdot z_\chi \right) -$$

$$\Sigma \dot{m}_g \left(h_g + \frac{v_g^2}{2} + g \cdot z_g \right) [kW] \quad (3)$$

Sistemin entropi değişimi ise;

$$\Delta S_{net} = \Delta S_{\text{üretim}} = \left(\Sigma \dot{m}_\chi \cdot S_\chi - \Sigma \dot{m}_g \cdot S_g \right) - \left(\frac{\dot{Q}_A}{T_K} \right) \left[\frac{kJ}{K} \right] \quad (4)$$

$$\dot{W}_{tr} = \Sigma \dot{m}_g \left(h_g - T_0 \cdot S_g + \frac{v_g^2}{2} + g \cdot z_g \right) -$$

$$\Sigma \dot{m}_\chi \left(h_\chi - T_0 \cdot S_\chi + \frac{v_\chi^2}{2} + g \cdot z_\chi \right) kW \quad (5)$$

Tersinmezlik ise tersinir iş ile gerçek iş arasındaki fark olup, aynı zamanda tersinmezlik işlemlerindeki net entropi değişimi ile çevre sıcaklığının çarpımına eşittir. Net entropi değişimi daima pozitif olduğundan tersinmezlik de daima pozitifdir. SASA için tersinmezlik aşağıdaki gibidir.

$$I = \dot{W}_{tr} - \dot{W}_y = T_0 \cdot \Delta S_{net} [kW] \quad (6)$$

Kapalı veya açık bir sistemin hareketli sınır işinin bir kısmı çevreye karşı yapıldığından, yapılan işten çıkarılarak faydalı iş elde edilir.

$$\dot{W}_{A,fay} = \dot{W}_A - P_0 \left(\frac{dv}{dt} \right) [kW] \quad (7)$$

$$\dot{W}_{A,fay} = Q_A \left(1 - \frac{T_0}{T_K} \right) - \frac{d}{dt} \int v_p (e + P_0 v -$$

$$T_0 s) dV - \int A_p (e + P v - T_0 s) \cdot (V^n) dA \quad (8)$$

SASA sistemlerinin sınırları sabit olup çevre işi söz konusu olmadığından sistemde yapılan gerçek iş faydalı işe eşittir.

$$\dot{W}_{fay} = \dot{W}_y [kW] \quad (9)$$

Sistemin çevresi ile dengede bulunduğu (sıcaklığın T_0 çevre sıcaklığı, basıncın P_0 çevre basıncı, kinetik enerjinin sıfır ve potansiyel enerjinin minimum olduğu hal) ve hiç iş elde edilemeyecek hale ölü hal denir. Sistem verilen bir halden ölü hale gelinceye kadar bütün işlemlerin tersinir olduğu ve ısı alışverişinin sadece çevre ile olduğu bir hal değişiminde sistemden alınan maksimum faydalı işe, sistemin kullanılabilir enerjisi (ekserjisi) denir.

$$\Phi = U + P_0V - T_0S - G_0 + \dot{m} \left(\frac{v^2}{2} + g(z - z_0) \right) \quad (10)$$

$$G = U_0 + P_0V_0 + T_0S_0 \quad (11)$$

Sistemin ölü haldeki fonksiyonu Gibbs fonksiyonudur. Bu durumda kinetik enerji ve potansiyel enerji, mekanik enerji hariç tutularak elde edilen, çevre şartlarına bağlı olarak maddenin özelliği elde edilir ve kullanılabilirlik olarak adlandırılır.

$$K = U_0 - P_0V - T_0S - G_0 \quad (12)$$

$$\psi = u + P_0V - T_0S - g_0 \quad (13)$$

Akış kullanılabilirliğinde, giriş hali indis olmadan yani ölü hal (0) indisiyle hesaplanırsa;

$$\psi = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \left[\frac{kJ}{kg} \right] \quad (14)$$

formülü elde edilir.

Sistemin bir hal değişimi için kullanılabilir enerji denklemi;

$$X_{Q12} - X_{W12} = X_2 - X_1 + X_{ky} \quad (15)$$

Kullanılabilir enerji denklemi SASA için;

$$\dot{W}_{fay} = \eta_c \dot{Q}_A + \sum \dot{m}_g \cdot \psi_g - \sum \dot{m}_\psi \psi_\psi - X_{ky} \quad (16)$$

Ayrıca anlık kayıp kullanılabilir enerji tersinmezliğe eşittir.

$$X_{ky} = I \quad (17)$$

İkinci kanun analizi ile kullanılabilir enerji kavramından yararlanılarak işlemin ne derece iyi ve mükemmel yakın olduğu incelenebilir. Kayıp kullanılabilir enerji tersinmezliğin bir ölçüsüdür ve işlemlerdeki tersinmezlikler arttıkça artacaktır.

$$\eta_{II} = \frac{\dot{W}_y}{\dot{W}_{tr}} \text{ (iş yapan makineler için)} \quad (18)$$

Bu tanım genel bir tanım olup, çevrimlerin dışında türbin, piston-silindir ve benzeri değişimlerine de uygulanabilir. İkinci kanun verimi iş gerektiren makineler içinde aşağıdaki gibi tanımlanabilir.

$$\eta_{II} = \frac{\dot{W}_{tr}}{\dot{W}_y} \text{ (iş gerektiren makineler için)} \quad (19)$$

Yukarıda ikinci yasa verimi için ortaya konan bağıntılar iş yapan ve iş gerektiren makineler için en genel şekilde tanımlanmıştır. Fakat bu tür bir amaca yönelik olmayan hal değişimlerini de kapsayacak daha genel bir ikinci yasa veriminin tanımlanmasına gerek vardır. İkinci yasa verimini tanımlamaktaki amaç tersinir hal değişimlerine hangi ölçüde yaklaşıldığını belirtmektir. Bu durumda ikinci yasa veriminin en kötü durumda sıfır (kullanılabilirliğin tümüyle yok edilmesi), en iyi durumda bir (kullanılabilirliğin tümüyle korunması) olacaktır. Bu düşünceyle ikinci yasa verimi;

$$\eta_{II} = 1 - \frac{\text{kayıp kullanılabilir enerji}}{\frac{\text{başlangıçtaki(mevcut)} \text{ kullanılabilir enerji}}{\text{kullanılabilir enerji}}}$$

veya

$$\eta_{II} = 1 - \frac{\text{kayıp kullanılabilir enerji}}{\frac{\text{sarf edilen kullanılabilir enerji}}{\text{kullanılabilir enerji}}} \quad (20)$$

olarak tanımlanabilir [12]. Bu hesaplamalarda donanım kot farkları ihmal edilmiştir.

3. Bulgular ve Tartışma

Hesaplamalarda İskan Sugözü Termik Santralinin 1 adet yüksek basınçlı türbin (YB), 1 adet orta basınçlı türbin (OB) ve 1 adet alçak basınçlı (AB) türbinleri kullanılmıştır. Üretim miktarları ise aşağıdaki gibidir.

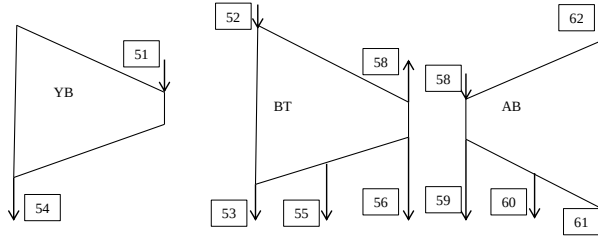
- YB türbin : 170 MW (η =%26)
- OB türbin : 250 MW (η =%38)
- AB türbin : 122 MW (η =%18)

Bu çalışmada her üç türbinin entropi ve entalpi verilerinin ölçümünü elde etmek için

Properties of Water/Steam paket programı kullanılmıştır. Ekserji hesaplamaları yapılırken alınan referans değerler ise ölü hal değerleridir. Mevcut sistem için bu değerler Tablo 3 içerisinde verilmiştir.

Tablo 3. Ekserji analizinde kullanılan parametreler için ölü hal değerleri

Parametreler	Değerler
T_0	25 °C
P_0	1 bar
h_0	104.9 kJ/kg
S_0	0,3669 kJ/kgK



Şekil 1. YB, OB ve AB türbinlerinin şematik görünümü

Tablo 4. YB türbin giriş değerleri

51 Noktası	Alınan Değerler
T_{51}	540 °C
P_{51}	172 bar
h_{51}	3396,9 kJ (prg. okunan)
$\dot{m}_{51}$	127,04 kg/s
s_{51}	6,401 kJ/kgK (prg. okunan)

Tablo 5. YB türbin çıkış değerleri

54 Noktası	Alınan Değerler
T_{54}	330,5 °C
P_{54}	40,42 bar
h_{54}	3044,21 kJ/kg (prg. okunan)
$\dot{m}_{54}$	127,04 kg/s
s_{54}	6,5 kJ/kgK (prg. okunan)

Tablo 6. OB türbin giriş-çıkış değerleri

52 Noktası	53 Noktası	55 Noktası	56 Noktası	58 Noktası
$T_{52}=540$ °C	$T_{53}=454,1$ °C	$T_{55}=354,2$ °C	$T_{56}=267$ °C	$T_{58}=267$ °C
$P_{52}=37,19$ bar	$P_{53}=21,30$ bar	$P_{55}=10,45$ bar	$P_{56}=5,19$ bar	$P_{58}=5,19$ 2 bar
$h_{52}=3538,$ 61kJ/kg	$h_{53}=3365,19$ kJ/kg	$h_{55}=3160,6$ kJ/kg	$h_{56}=2995,76$ kJ/kg	$h_{58}=2995,$ 76 kJ/kg
$\dot{m}_{52}=115,16$ kg/s	$\dot{m}_{53}=6,916$ kg/s	$\dot{m}_{55}=1,765$ kg/s	$\dot{m}_{56}=5,815$ kg/s	$\dot{m}_{58}=100$,669 kg/s
$s_{52}=7,241$ kJ/kgK	$s_{53}=7,267$ kJ/kgK	$s_{55}=7,296$ kJ/kgK	$s_{56}=7,32$ kJ/kgK	$s_{58}=7,32$ kJ/kgK

Tablo 7. AB türbin-giriş çıkış değerleri

58 Noktası	59 Noktası	60 Noktası	61 Noktası	62 Noktası
$T_{58}=267$ °C	$T_{59}=168,6$ °C	$T_{60}=82,46$ °C	$T_{61}=65,7$ °C	$T_{62}=43,1$ °C
$P_{58}=5,192$ bar	$P_{59}=1,954$ bar	$P_{60}=0,5249$ bar	$P_{61}=0,085$ bar	$P_{62}=0,085$ bar
$h_{58}=2995,76$ kJ/kg	$h_{59}=2807,1$ kJ/kg	$h_{60}=2596,8$ kJ/kg	$h_{61}=2622,7$ kJ/kg	$h_{62}=2374,66$ kJ/kg
$\dot{m}_{58}=100,669$ kg/s	$\dot{m}_{59}=6,35$ kg/s	$\dot{m}_{60}=2,429$ kg/s	$\dot{m}_{61}=2,1625$ kg/s	$\dot{m}_{62}=89,63$ kg/s
$s_{58}=7,32$ kJ/kgK	$s_{59}=7,3789$ kJ/kgK	$s_{60}=7,434$ kJ/kgK	$s_{61}=7,475$ kJ/kgK	$s_{62}=7,563$ kJ/kgK

Termik santrale, işletme verileri kullanılarak uygulanan ekserji analizinde elde edilen sonuçlar yukarıda belirtilmiştir. Yapılan bütün hesaplamalarda Tablo 3'te belirtilen referans haldeki değerler başlangıç olarak kabul edilmiştir. Daha sonra türbine giren buhar genişleyerek iş yapmaktadır. Kazan çıkışı basınç ve sıcaklık değerleri ile ilk olarak yüksek basınç türbinine giren buhar burada 40,42 bar basınçta kadar genişlemekte ve 330,5 °C sıcaklığa kadar düşmektedir. Burada verim %92,27 civarındadır. Kabul edilen değerler ile programdan elde edilen veriler Tablo 4 ve 5'te sunulmaktadır. Orta basınç türbinine gönderilmeden önce buhar tekrar kazana gönderilerek kızdırma işlemi yapılmakta ve sıcaklık tekrar yükseltilerek buharın kullanılabilirliği artırılmaktadır. Tablo 6 ve 7'den alınan veriler ile yapılan hesaplamalar sonucunda orta basınç türbininin ve alçak basınç

türbinin verimleri sırasıyla %91,85 ve %92,27 olarak hesaplanmıştır. Türbin kademelerinden alınan ara buharların gönderildiği ön ısıtıcılarda, çevrim suyu kazana girmeden önce ısıtılmaktadır. Böylece santralin verimi arttırılmaktadır. Türbinde genişleyen buhar tarafından iş yapılmaktadır. Türbinde daha fazla iş elde edilmesi yani türbin gücünün arttırılması türbine giren buharın kalitesine, dolayısıyla buhar akışının kullanılabilirliğine bağlıdır. Çok yüksek sıcaklık ve basınçtaki buharın akış kullanılabilirliği fazla olacağından elde edilen yararlı iş artacaktır. Kazandan çıkan ve türbine giren buharın, giriş sıcaklığı ve basıncı arttıkça, türbin tesirliliği artmaktadır. Yukarıdaki türbin hesaplamalarında yüksek basınç türbininin giriş sıcaklığı 540 °C ve basıncı 172 bar'dır. Türbine giren buharın akış kullanılabilirliğinin yüksek olması aynı zamanda türbin kademelerinden alınan ara buharında yüksek sıcaklıkta olmasını sağlar. Dolayısıyla çevrim suyunu ısıtan ön ısıtıcılarında verimi arttırır. Bu diğer birimlerin ve çevrimin genel veriminin artması demektir.

4. Sonuç

Hesaplamalarda bulunan, her bir ekipmana ait ikinci yasa verimi ve kayıp kullanılabilir enerji değerleri Tablo 8'de verilmektedir.

Tablo 8. Her ekipman için ekserji ve enerji değerleri

Ekipman	İkinci yasa verimi (%)	Kayıp Kullanılabilir Enerji (kW)
Yüksek basınç türbini (YB)	92,27	3749,53
Orta basınç türbini (OB)	91,85	5066,45
Alçak basınç türbini (AB)	92,27	5088,46

Bu çalışmada termik santrallerin önemi ve enerji üretiminde kömür kullanımına karşı büyük avantajlara sahip linyit yakıtlı mevcut bir termik santrale (İSKEN Sugözü Termik Santrali) ekserji analizi uygulanmıştır. Türkiye'nin olası petrol ve doğalgaz krizlerine müdahale gücünün olmaması, enerji kaynağının temininde güvenilirlik gerekliliğini ön plana çıkarmaktadır. Bu ise, yerli kaynakların (linyit, jeotermal, hidroelektrik vs) enerji ihtiyacını karşılamada kullanım oranının arttırılması ile mümkündür. Kömür yataklarının Türkiye'nin çeşitli bölgelerine dağılmış olması, eko-coğrafik-

kültürel kalkınmaya son derece olumlu etkide bulunması, işletilmesi sebebiyle ortaya çıkan katma değer, elektrik enerjisi üretiminde kWh başına ucuz hammadde olması ve emniyetli taşınması gibi faktörler kömürü Türkiye'nin en önemli fosil enerji kaynağı haline getirmektedir. Ana hatlarıyla enerji kaynağı temini sorununun çözümü, enerji yelpazesinin kalitesinin arttırılmasıyla mümkün olacaktır. Bunu gerçekleştirebilmek için ucuz ve güvenilir enerji üretim teknolojilerinin geliştirilip hayata geçirilmesinin yanı sıra hali hazırda olan enerji üretim santrallerinin çevreye karşı olan zararlarını minimize edecek ve verimliliğini arttıracak önlemler alınmalıdır.

Enerji verimliliğini arttırmak için enerji üreten mühendislik sistemlerinde dikkatli bir şekilde enerji denetlemeleri yapılmalı ve alternatif çözümler sunulmalıdır. Günümüzde birçok sanayi işletmesinin verimliliğinin tespit edilip arttırılması için termodinamik analizlerin uygulanması büyük önem kazanmıştır. Yapılan bu çalışmada da, termik santralde işletme verileri kullanılarak sistemin türbinine ekserji analizi uygulanarak, ekserji kayıpları belirlenmiş ve ekserjik verim (tesirlilik) elde edilmiştir. Verimliliğe tesir eden değişik sıcaklık ve basınç değerleri için tesirlilik değişimi incelenmiştir. Ayrıca incelenen üç türbin (YB, OB, AB) için ikinci kanun verimleri hesaplanmıştır. Dolayısıyla yapılan bu ve benzeri çalışmalarla diğer tecrübelerden yola çıkılarak Türkiye'de iyi bir potansiyele sahip linyit rezervlerini, enerji üretiminde değerlendirerek, termik ve diğer enerji santrallerinin kurulması ve geliştirilmesi yönünde çalışmalar arttırılmalıdır.

Simge Listesi

g	Yer çekimi ivmesi (m/s^2)
G	Gibbs enerjisi (J)
I	Tersinmezlik (kW)
K	Kullanılabilirlik (kJ)
$\dot{m}_c$	Çıkış kütleli debisi (kg/s)
$\dot{m}_g$	Giriş kütleli debisi (kg/s)
S_c	Birim kütlede çıkış entropisi (kJ/kgK)
S_g	Birim kütlede giriş entropisi (kJ/kgK)
T_K, T_0	Çevre sıcaklığı (K)
V	Hız (m/s)
$\dot{Q}$	Birim zamanda ısı alışverişi (kJ)

$\dot{W}_A$ = Birim zamanda iş alışverişi (kW/s)
 $\dot{W}_{\text{fay}}$ = Faydalı iş (kW)
 $\dot{W}_{\text{ter}}$ = Tersinir iş (kW)
 $\dot{W}_y$ = Yararlı (gerçek) iş (kW)
 X_{ky} = Kayıp kullanılabilir enerji (kJ)
 X_1 = Sistemin ilk hal enerjisi (kJ)
 X_2 = Sistemin son hal enerjisi (kJ)
 X_{Q12} = Isının kullanılabilir enerjisi (kJ)
 X_{W12} = Faydalı iş (kW)
 z = Yükseklik (m)
 Φ = Ekserji (kW)
 ΔS_{net} = Sistemin toplam entropi değişimi (kW/K)
 η_{II} = İkinci kanun verimi (Tesirlilik)
 ψ = Akış-kullanılabilirliği

5. Kaynaklar

1. Erduranlı, P. 1997, "Enerji Santraline Ekserji Analizinin Uygulanması", Y. Lisans Tezi, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Zonguldak.
2. Çengel, Y. Boles, M.A. 1999, "Mühendislik Yaklaşımıyla Termodinamik", Literatür Yayıncılık, İstanbul.
3. www.tki.gov.tr (2006, Şubat)
4. Vizyon 2023 Teknoloji Öngörü Projesi (2003), "Enerji ve Doğal Kaynaklar Paneli Raporu", TÜBİTAK, Ankara.
5. Çomaklı, K. "Isıtma Merkezinin Enerji ve Ekserji Analizi" 2003, Doktora Tezi, Mühendislik Fakültesi, Atatürk Üniversitesi.
6. Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi 2005, Cilt 10, Sayı 1.
7. Geredelioğlu, Ç. "Çayırhan Termik Santralinin Enerji ve Ekserji Analizi" 2011, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Isparta.
8. Akgül, M. Ali, "Dört Kademeli Pistonlu Tip Bir CO₂ Kompresör Sisteminde Enerji ve Ekserji Analizi" 2012, Y. Lisans Tezi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Marmara Üniversitesi.
9. Ilık, A. "Trijenerasyon Sistemlerinin Enerji ve Ekserji Analizi" 2012, Y. Lisans Tezi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı, Süleyman Demirel Üniversitesi.
10. Goyal, V., Dondapati, R., Dang, R., Mangal, S.K. 2014, "Exergy Analysis of a 210 MW Unit at 1260 MW Thermal Plant in India, 2nd International Conference on Artificial Intelligence, Modeling and Simulation, 7102465, pp. 228-233" AIMS.
11. Abdalisousan, A., Fani, M., Farhanieh, B., Abbaspour, M. 2014, "Effect of decision variables in the steam section for the exergoeconomic analysis of TCCGT power plant: A case study, Energy and Environment".
12. Çengel, Y. Boles, M.A. 2012, "Mühendislik Yaklaşımıyla Termodinamik", Güven Kitabevi, İzmir.

Şeker Pancarı Melası Kullanılarak *Gluconacetobacter xylinus* NRRL B-759 ile Bakteriyel Selüloz Üretimi Üzerine Etanolün Etkisi

Y. Emre ÖZ¹ ve *Mehmet KALENDER²

Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Biyomühendislik Bölümü, Elazığ
¹yunusemreoz55@hotmail.com, ^{2,*}mkalender@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 22.01.2017; Kabul/Accepted: 28. 04.2017)

Özet

Selüloz dünyada en yaygın bulunan makromoleküler yapılardan biridir ve genellikle bitkilerden elde edilir. Kâğıt kullanımının artması ve tıp alanındaki bazı gelişmelerden dolayı günümüzde araştırmacılar alternatif selüloz üretme yöntemlerine odaklanmışlardır. Bakteriyel selüloz formül olarak bitkisel selüloz ile aynı olmasına rağmen su tutma kapasitesi, polimerizasyon derecesi ve yüksek saflık gibi bazı özellikler bakımından bitkisel selülozdan farklıdır. Bu çalışmada, besi yeri ve karbon kaynağı olarak şeker pancarı melası kullanılarak *Gluconacetobacter xylinus* NRRL B-759 tarafından bakteriyel selüloz üretimi incelenmiştir. Bu amaçla, bakteriyel selüloz üretiminde melas konsantrasyonunun etkisi (40-240 g/L) ve besi yerine etanol ilavesinin etkisi (5-20 g/L) araştırılmıştır. Sonuç olarak melas konsantrasyonunun artmasıyla 200 g/L konsantrasyona kadar bakteriyel selüloz üretiminin arttığı ve daha sonra azaldığı görülmüştür. Etanol ilavesinin yapıldığı çalışmalarda etanolü besiyerinde üretilen bakteriyel selüloz miktarının etanolsüz ortama göre en çok 10 g/L etanol ilavesinde arttığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Bakteriyel selüloz, Melas, Etanol, *Gluconacetobacter xylinus* NRRL B-759.

Bacterial Cellulose Production by *Gluconacetobacter xylinus* NRRL B-759 Using Sugar Beet Molasses

Abstract

Cellulose is a macromolecular structure which is one of the most common in the world. It is usually obtained from plants. Because of increasing use of paper and developments in the field of medicine, it has been focused by the researches on alternative production techniques for the cellulose production. Bacterial cellulose with some properties like high purity and high water holding capacity is a good alternative technique among those production techniques. In this study, it has been investigated the bacterial cellulose production by *Gluconacetobacter xylinus* NRRL B-759 strains using sugar beet molasses as nutrient and carbon source. For this purpose, the effect of the concentration (40-240 g/L) on molasses and addition of ethanol (5-20 g/L) on the bacterial cellulose production has been studied. As a result, it has been observed that cellulose production increases with increasing of the concentration of molasses until 200 g/L, and then decreases. The results of ethanol addition experiments showed that the highest cellulose production has been obtained at ethanol concentration of 10 g/L added to fermentation media containing molasses.

Keywords: Bacterial Cellulose, Molasses, Ethanol, *Gluconacetobacter xylinus* NRRL B-759.

1. Giriş

Genellikle bitkilerden elde edilen selüloz, dünyada en çok bulunan makromoleküldür [1]. Bitkilerin hücre duvarı yapısında bulunan selüloz sanayide geniş kullanım alanlarına sahip bir biyopolimerdir. Endüstride kullanılan selülozlar genellikle pamuk (% 94 selüloz) ve ağaçtan (% 50'den fazla) elde edilmektedir. Bitkilerde selüloz hemiselüloz, lignin ve pektin ile birlikte bulunur. Bu yüzden endüstride

selülozun kullanılmadan önce bu yapılardan ayrılması gerekir ve bu da ek maliyet ile birlikte birçok kimyasal madde kullanımı gerektirir. Günümüzde artan nüfus ile birlikte selüloza olan ihtiyacın artması da kaçınılmazdır ve bunun sonucu olarak ormanların daha fazla tahrip edilmesi söz konusudur. Bu yüzden, son yıllarda dünya üzerinde orman arazilerinin hızla azalması ve biyoteknolojideki gelişmeler bilim insanlarını bitkiler olmadan selüloz üretme konusu üzerinde yoğunlaşmalarına sebep

olmuştur. Yapılan çalışmalarda algler, küfler ve bakterilerin selüloz üretebildiğini fakat bunlar arasında bakterilerin endüstriyel seviyede selüloz üretebildiği görülmüştür. *Gluconacetobacter*, *Agrobacterium*, *Aerobacter*, *Azotobacter*, *Rhizobium*, *Sarcina*, *Salmonella*, *Enterobacter*, *Escherichia* gibi birçok bakteri türünün ve birkaç siyanobakter türünün selüloz ürettiği yapılan çalışmalarda bildirilmiştir [2, 3].

Bakteriyel selüloz (BS) ile bitkisel selüloz aynı moleküler formülü ($C_6H_{10}O_5$)n paylaşmasına rağmen, fizikokimyasal özellikleri farklıdır. Bitkisel selüloz ile karşılaştırıldığında BS yüksek su tutma kapasitesi, kristalinite, porozite, polimerizasyon derecesi, yüksek fiber ağ yapısı ve yüksek saflık gibi özelliklere sahiptir [4]. Bakteriyel selülozun gelişmiş mekanik özellikleri, selülozik fiberlerin eşit ve sürekli dağılımına bağlıdır. Bu özellikler kültür koşulları, mikroorganizma ve fermentasyon besi yeri bileşenleri gibi faktörlerden etkilenmektedir. Bu son derece işlevsel biyopolimerin çok yönlü özelliklerinden dolayı BS, doku mühendisliği doku iskelesi uygulamaları, yara iyileştirme uygulamaları, geniş yanıklarda yapay deri, deri dokusu onarımı, mikrocerrahi için yapay kan damarları, kağıt endüstrisi [5], dolgunlaştırıcı ve stabilize edici madde olarak gıda endüstrisini de içeren birçok alanda kullanılmaktadır [6].

Bakteriyel selüloz üretimini karbon kaynağı, azot kaynağı, pH, sıcaklık, çözünmüş oksijen gibi çeşitli parametrelerden etkilenmektedir. Yapılan çalışmalarda karbon kaynağı olarak arabinoz ve ksiloz gibi pentozlar, glikoz, früktoz ve mannoz gibi monosakkaritler, laktoz, sükroz ve maltoz gibi disakkaritler, dekstran, levan ve nişasta gibi polisakkaritler; kullanılmıştır. Azot kaynağı olarak ise maya ekstratı, pepton, kazamino asit ve mısır ıslatma suyu kullanılmıştır. Çeşitli uygulamalarda BS'nin yüksek potansiyeline rağmen yüksek BS üretim maliyeti endüstriyel uygulamaların engellenmesinde en büyük sorundur. Fermentasyon ortamı olarak endüstriyel atıklardan ve yan ürünlerden faydalanılması BS üretimini için maliyet açısından rekabeti geliştirebilir. Son yıllarda meyve suyu [7], akçağaç pekmezi [8], buğday sapı [9], ladin hidrolizati [10], biyodizel üretim prosesinden ham gliserol, üzüm posası, aseton-bütanol-

etanol fermentasyonu atık suyu [11] ve melas [12] gibi hammaddeler BS üretim maliyetini azaltmak için fermentasyon ortamı olarak yapılan çeşitli çalışmalarda kullanılmıştır.

Bakteriyel selüloz üretiminde kullanılan karbon kaynağı, mikroorganizma türü ve azot kaynağı gibi parametrelere bağlı olarak elde edilen selülozun özelliklerinde de farklılıklar meydana gelmektedir [13]. Bu da kültür ortamında çeşitli faktörleri değiştirerek istenilen özellikte bakteriyel selüloz üretimine olanak sağlar.

2. Materyal ve Metot

2.1. Mikroorganizma ve kültür ortamı

Çalışmada liyofilize haldeki *Gluconacetobacter xylinus* NRRL B-759 suşu ve melas çözeltisi hazırlamak için Elazığ Şeker Fabrikasından alınan % 50 şeker içeriğine sahip melas kullanılmıştır.

Çalışmada kullanılan Hestrin & Schramm besi yeri (HS besi yeri) içeriği ağırlık/hacimce % 2 glikoz, % 0.5 pepton, % 0.5 maya ekstratı, % 0.27 Na_2HPO_4 , % 0.15 sitrik asit olup distile su ile besi yeri hazırlandıktan sonra *Gluconacetobacter xylinus* NRRL B-759 suşu için pH 5'e 1 N asetik asit çözeltisi ile ayarlanmıştır. Hazırlanan besi yeri 121 °C'de 15 dk boyunca otoklav ile steril edilmiştir. Steril besi yerinden 50 ml alınarak 250 ml erlene konulmuştur ve steril şartlar altında liyofilize haldeki *Gluconacetobacter xylinus* NRRL B-759 suşunun ekimi yapılmıştır. Ekim yapıldıktan sonra statik kültürde 30 °C'de 7 gün boyunca inkübasyona bırakılmış ve bu süre sonunda selüloz oluşumu gözlemlenmiştir. Selüloz oluşumu gözlemlendikten sonra bu kültürün % 60' lık steril gliserol çözeltisiyle stok kültürü yapılmıştır. Eppendorf tüplere 100 µl kültür koyulduktan sonra üzerine hazırlanan gliserolden 1000 µl yavaşça ilave edilip -80 °C'de saklanmaya bırakılmıştır. Elde edilen bu stoklar daha sonraki selüloz üretim çalışmalarında kullanılmıştır. 200 g/L şeker konsantrasyonunda melas stok çözeltisi hazırlamak için 1 L'lik balon jöjeye 400 g melas tartılarak koyulmuştur. Daha sonra 1 N asetik asit çözeltisi ile pH = 5'e ayarlanıp, 121 °C'de 15 dk sterilizasyon işlemi uygulanmıştır. Steril

edilen melas çözeltisi 40, 80, 120, 160, 2000 ve 240 g/L konsantrasyonlara seyreltilmiştir.

2.2. Fermantasyon süresinin belirlenmesi

Fermantasyon çalışmalarından önce fermantasyon süresinin belirlenmesi amacıyla hazırlanan stoklardan biri, içerisinde 10 ml HS besi yeri bulunan 50 ml'lik erlene ekilmiştir ve statik kültürde 30 °C' de 3 gün bekletilmiştir. Daha sonra içinde 18 ml taze besi yeri bulunan başka bir erlene önceki kültürden 2 ml ekim yapılmış ve yine aynı koşullarda 3 gün daha bekletilmiştir. Bu işlemlerin sonunda melaslı besi yerinde kontrollü 10 set ile fermantasyon süresi belirleme çalışması yapılmıştır. İçerisinde 45 ml melaslı besi yeri bulunan 250'lik erlene 5 ml son kültürden ekim yapılarak statik kültürde 30 °C'de bir süre boyunca kültürdeki şeker tüketimi ve selüloz oluşumu incelenmiştir. Bunun için belirli zaman aralıklarında kültürlerden örnekler alınarak şeker analizi ve oluşan selüloz miktarı belirlenerek bu işlemler sonucunda optimum fermantasyon süresi belirlenmiştir.

Fermantasyon süreleri belirlendikten sonra yapılan fermantasyon işlemlerinde farklı melas konsantrasyonlarında (40-240 g/L) ve farklı miktarda etanol ilaveli (5-20 g/L) besi yerlerinde selüloz üretimi incelenmiştir. Fermantasyon sonrası elde edilen bakteriyel selüloz saflaştırılmıştır.

2.3. Selülozun saflaştırılması ve kurutulması

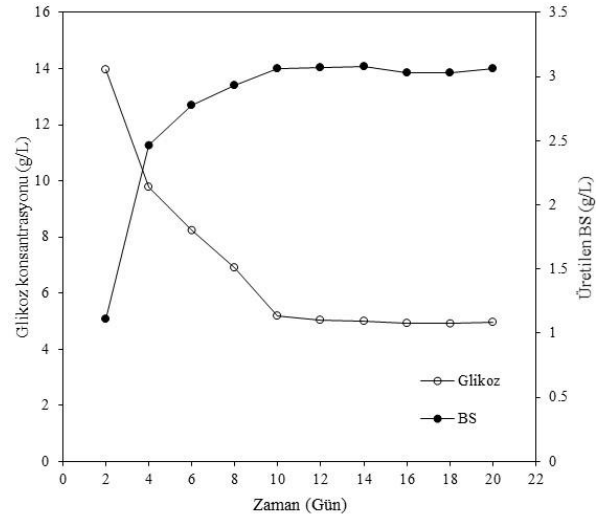
Fermantasyon süresi sonunda üretilen bakteriyel selülozlar kurutulmadan önce selülozlar besi yerinden ayrılmış ve daha sonra selülozdan hücreleri tamamen uzaklaştırmak için 4200 rpm' de 15 dk santrifüj işlemi uygulanmıştır. Santrifüjlenen selülozlar 0.1 N NaOH ile 90 °C'deki su banyosunda yaklaşık olarak bir saat bekletilmiştir. Bu işlem sonrasında selüloz 1 N asetik asit ile nötrleştirilip üç kez distile su ile yıkanmıştır. Son olarak bakteriyel selüloz 70 °C' deki etüvde ağırlığı sabitleninceye kadar kurutulmuştur.

2.4. Üretilen selülozların fonksiyonel gruplarının belirlenmesi

BS filmlerinin FTIR analizleri, ATI Unicam Mattson 1000 cihazı kullanılarak yapılmıştır. Absorpsiyon modunda, 4000-400 cm⁻¹ frekans aralığında, 4 cm⁻¹ çözünürlük ile numune başına toplam 50 kümülatif tarama yapılmıştır.

3. Sonuçlar ve Tartışma

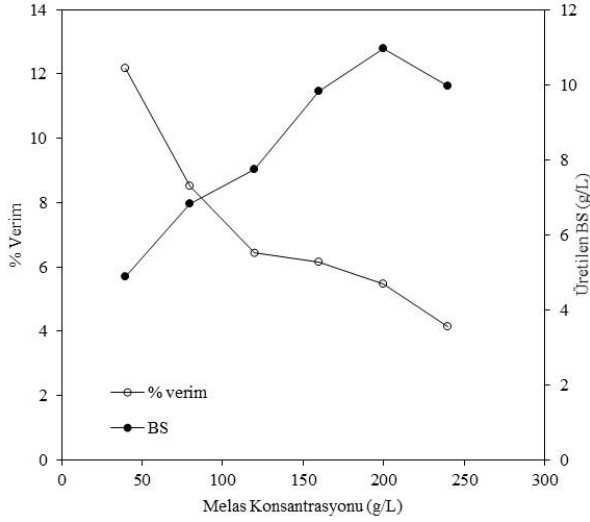
HS besi yerinde fermantasyon süresini belirlemek için statik kültürde 30 °C' de çalışılmış ve optimum fermantasyon süresi belirlenmiştir. Bu amaçla 20 gün boyunca 2 günde bir üretilen bakteriyel selüloz ve tüketilen glikoz miktarı belirlenmiştir. Bu süreler sonunda zamanla oluşan bakteriyel selüloz ve tükenen glikoz konsantrasyon değerleri Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. HS besi yerinde zamanla oluşan bakteriyel selüloz ve tükenen glikoz konsantrasyonları

Şekil 1'de görüldüğü gibi 10. günden sonra fazla miktarda selüloz üretimi gözlenmediği için fermantasyon süresi 10 gün olarak kabul edilmiştir. Optimum fermantasyon süresi belirlendikten sonra bu süre melas ortamı için de kullanılmıştır. Bu amaçla, farklı miktarlarda melas konsantrasyonunun ve etanol ilavesinin bakteriyel selüloz üretimine etkisi incelenmiştir. Etanolün kullanılmadığı deney için farklı melas konsantrasyonlarında üretilen selüloz miktarları ile % verim değerlerini gösteren bir grafik Şekil 2'de gösterilmiştir. Şekil 2'deki verim değerleri

melastaki şeker konsantrasyonuna göre hesaplanmıştır.

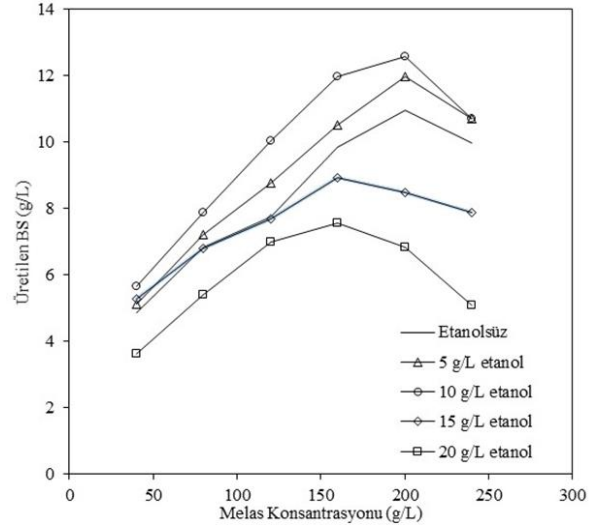


Şekil 2. Melas konsantrasyonu ile üretilen selüloz konsantrasyonunun ve yüzde verim değişimi

Farklı melas konsantrasyonlarında yapılan çalışmalarda 200 g/L melas konsantrasyonuna (100 g/L şeker içeriğine karşılık gelir) kadar üretilen bakteriyel selüloz miktarlarının arttığı daha sonraki konsantrasyonlarda ise azaldığı görülmüştür. Bunun sebebi çok yüksek konsantrasyonlardaki melasın suş üzerinde substrat inhibisyonu olabilir. Şekil 2’de yüzde verim değerleri incelendiğinde melas konsantrasyonu artışı ile verim değerlerinin sürekli olarak azaldığı görülmektedir. Bazı çalışmalarda statik kültür ile BS üretiminde meydana gelen selülozun kültür ortamına transfer olan havayı engellediği sonucuna ulaşılmıştır [5, 14–17]. Şekil 2’de özellikle 200 g/L melas konsantrasyonunun altındaki verim değerlerindeki düşüşün kültür ortamında meydana gelen bu hava azlığından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Şekil 3’de farklı miktarda etanol ilavesinin bakteriyel selüloz üretimine etkisi gösterilmiştir. Şekil 3’den görüldüğü gibi, çalışılan tüm melas konsantrasyonlarında en yüksek bakteriyel selüloz üretim değerlerine 10 g/L etanol eklenen besi yerlerinde ulaşılmıştır. Naritomi ve ark.’nın etanol ilavesinin selüloz üretimine etkisini araştırdıkları bir çalışmada selüloz üretiminde fruktozlu besi yerine 10 g/L etanol ilavesinin selüloz üretimini arttırmak için optimum değer olduğunu bulmuşlardır [18]. Bu durum,

gerçekleştirilen bu çalışmada etanol ilavesi için elde edilen sonuçların literatür ile uyumlu olduğunu göstermektedir.



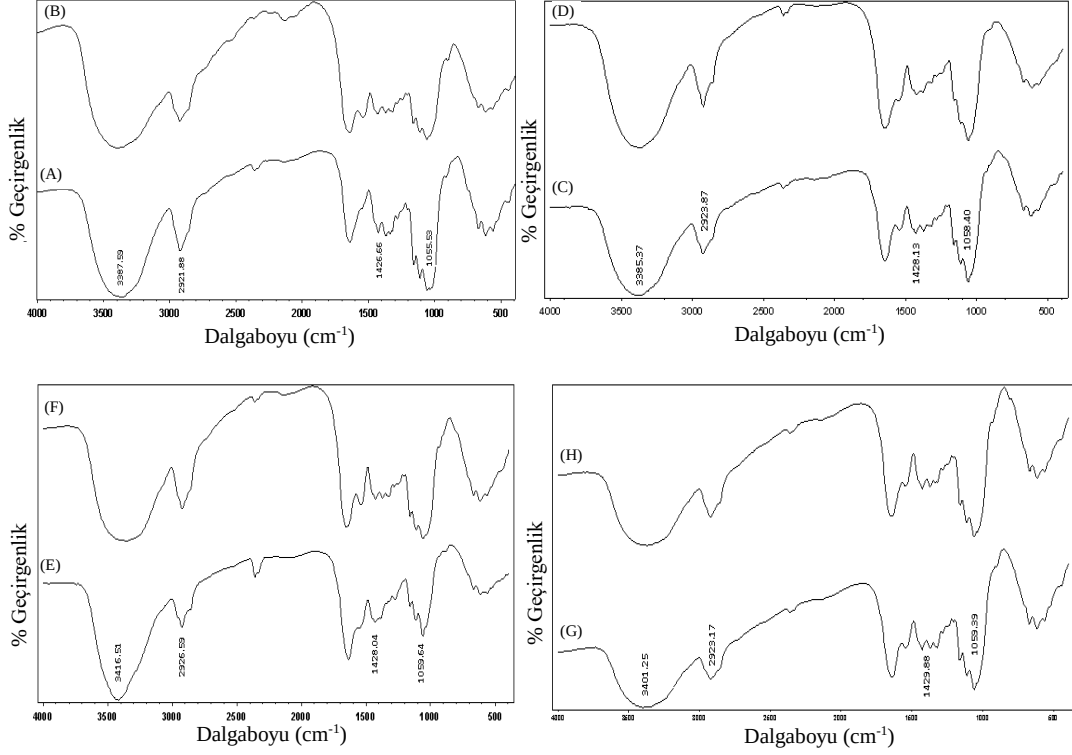
Şekil 3. Melas konsantrasyonu ve etanol ilavesinin selüloz üretimine etkisi

Etanolsüz, 5 ve 10 g/L etanol içeren ortamlarda gerçekleştirilen çalışmalarda en yüksek BS üretim miktarının 200 g/L melas konsantrasyonunda olduğu Şekil 3’den görülmektedir. Diğer taraftan yüksek etanol (15 ve 20 g/L) ilavesiyle gerçekleştirilen çalışmalarda ise en yüksek BS üretimi 160 g/L melas konsantrasyonunda elde edilmiştir. 15 ve 20 g/L etanol ilavelerinde bakteriyel selüloz üretiminin düştüğü görülmektedir. Bu duruma yüksek konsantrasyonlarda etanol ilavesi ile kültür ortamında etanolün dezenfektan etkisinin sebep olduğu düşünülmektedir.

Bakteriyel selülozun fonksiyonel grupları 4000-40 cm^{-1} dalga boyu aralığında FTIR analizleri ile belirlenmiştir. Şekil 4’ de 11 g/L etanolü ve etanolsüz besi yerlerinden üretilen bakteriyel selülozlar için FTIR spektrumları gösterilmiştir. 0-160 g/L aralığında melas konsantrasyonu ve farklı oranlarda etanol içeriğine sahip besi yerlerinde sentezlenen bakteriyel selülozların hepsinde 3400 cm^{-1} bandında selülozun hidroksil grubu (-OH) gerilme titreşim frekansına karşılık gelmektedir. Bakteriyel selüloz yüksek oranda polar hidroksil grup içerir. Bu yüzden moleküler zincirler molekül içi ve moleküller arası hidrojen bağları ile etkileşime girmektedir [19]. Tüm numuneler, tipik selüloz tip I’in C-H bağının absorpsiyon

spektrumuna karşılık gelen 2900 cm^{-1} dalga boyunda pik verdiği görülmüştür. 1430 cm^{-1} bandı metil ve metilenin asimetrik deformasyon titreşimi için 1367 cm^{-1} 'deki bant CH_2 eğilme titreşimi için 1055 cm^{-1} 'deki bant şeker

halkasının C-O-C ve C-O-H gerilme titreşimi için etanol içeren ve içermeyen besi yerlerinde farklı konsantrasyonlarda üretilen bakteriyel selülozların karakteristik bantlarını göstermektedir [20, 21]



Şekil 4. Farklı şartlarda üretilen bakteriyel selülozların FTIR analiz sonuçları (A: 40 g/L Melas, B: 40 g/L Melas + 10 g/L Etanol, C: 80 g/L Melas, D: 80 g/L Melas + 10 g/L Etanol, E: 120 g/L Melas, F: 120 g/L Melas + 10 g/L Etanol, G: 160 g/L Melas, H: 160 g/L Melas + 10 g/L Etanol).

Genel olarak bakıldığında etanol ilavesi yapılmadan elde edilen bakteriyel selüloz yapısı ile etanol ilavesi yapılan besi yerinde üretilen bakteriyel selüloz yapısı arasında belirgin bir farklılık gözlenmemiştir. Bu da etanol ilavesi ile üretilen bakteriyel selülozun işlevsel grupları arasında pek bir farkın olmadığını göstermektedir.

4. Kaynaklar

1. Czaja, W., Romanovicz, D. and Brown, R. M. (2004). Structural Investigations of Microbial Cellulose produced in Stationary and Agitated Culture, Cellulose, 11.
2. Dazzo, F. B., Napoli, C., Dazzo, F., & Hubbell, D.

(1975). Production of cellulose microfibrils in Rhizobium Production of Cellulose Microfibrils by Rhizobium1, (September 2016).

3. Gupta, B. S. H. S. G. (2010). Production of bacterial cellulose from Enterobacter amnigenus GH-1 isolated from rotten apple, 1823–1828. doi:10.1007/s11274-010-0363-1

4. Phisalaphong, M., & Jatupaiboon, N. (2008). Biosynthesis and characterization of bacteria cellulose – chitosan film, 74, 482–488. doi:10.1016/j.carbpol.2008.04.004

5. Chawla, P. R., Bajaj, I. B., Survase, S. A., & Singhal, R. S. (2009). Microbial Cellulose: Fermentative Production and Applications, 47(2), 107–124.

6. Paximada, P., Tsouko, E., Kopsahelis, N., Koutinas, A. A., & Mandala, I. (2016). Food

- Hydrocolloids Bacterial cellulose as stabilizer of o / w emulsions. *Food hydrocolloids*, 53, 225–232. doi:10.1016/j.foodhyd.2014.12.003
7. Kurosumi, A., Sasaki, C., Yamashita, Y., & Nakamura, Y. (2009). Utilization of various fruit juices as carbon source for production of bacterial cellulose by *Acetobacter xylinum* NBRC 13693. *Carbohydrate Polymers*, 76(2), 333–335. doi:10.1016/j.carbpol.2008.11.009
8. Zeng, X., Small, D. P., & Wan, W. (2011). Statistical optimization of culture conditions for bacterial cellulose production by *Acetobacter xylinum* BPR 2001 from maple syrup. *Carbohydrate Polymers*, 85(3), 506–513. doi:10.1016/j.carbpol.2011.02.034
9. Chen, L. (2012). Biotransformation of wheat straw to bacterial cellulose and its mechanism, (October). doi:10.1016/j.biortech.2012.10.029
10. Guo, X., Cavka, A., Jönsson, L. J., & Hong, F. (2013). Comparison of methods for detoxification of spruce hydrolysate for bacterial cellulose production, 1–14.
11. Li, Z., Wang, L., Hua, J., Jia, S., Zhang, J., & Liu, H. (2015). Production of nano bacterial cellulose from waste water of candied jujube-processing industry using *Acetobacter xylinum*. *Carbohydrate Polymers*, 120, 115–119. doi:10.1016/j.carbpol.2014.11.061
12. Shoda, S. O. B. M. (2005). Production of bacterial cellulose by *Acetobacter xylinum* BPR2001 using molasses medium in a jar fermentor, 45–51. doi:10.1007/s00253-004-1723-2
13. Mohammadkazemi, F., Azin, M., & Ashori, A. (2015). Production of bacterial cellulose using different carbon sources and culture media. *Carbohydrate Polymers*, 117, 518–523. doi:10.1016/j.carbpol.2014.10.008
14. Esa, F., Tasirin, S. M., & Rahman, N. A. (2014). Overview of Bacterial Cellulose Production and Application. *Italian Oral Surgery*, 2, 113–119. doi:10.1016/j.aaspro.2014.11.017
15. Krystynowicz, A., Czaja, W., Jezierska, A. W., Gonc, M., Mis'kiewicz, A., Turkiewicz, M., & Bielecki, S. (2002). Factors affecting the yield and properties of bacterial cellulose. *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology*, 29(July), 189–195. doi:10.1038/sj.jim.7000303
16. Budhiono, A., Rosidi, B., Taher, H., & Iguchi, M. (1999). Kinetic aspects of bacterial cellulose formation in nata-de-coco culture system. *Carbohydrate Polymers*, 40(2), 137–143. doi:10.1016/S0144-8617(99)00050-8
17. Watanabe, K., & Yamanaka, S. (1995). Effects of Oxygen Tension in the Gaseous Phase on Production and Physical Properties of Bacterial Cellulose Formed under Static Culture Conditions. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, 59(1), 65–68. doi:10.1271/bbb.59.65
18. Naritomi, T., Kouda, T., Yano, H., & Yoshinaga, F. (1998). Effect of ethanol on bacterial cellulose production from fructose in continuous culture. *Journal of Fermentation and Bioengineering*, 85(6), 598–603. doi:10.1016/S0922-338X(98)80012-3
19. Maréchal, Y., & Chanzy, H. (2000). The hydrogen bond network in I(β) cellulose as observed by infrared spectrometry. *Journal of Molecular Structure*, 523(1-3), 183–196. doi:10.1016/S0022-2860(99)00389-0
20. Nelson, M.L., O'Connor, R. T. (1964). Bands, Relation of Certain Infrared Bands to Cellulose Crystallinity and Crystal Lattice Type. Part 1. Spectra of Lattice Types I, II; III and Of Amorphous Cellulose. 8, (Journal of Applied Polymer Science), 1311–1324.
21. Park, J.K., Park, Y.H., Jung, J. Y. (2003). Production of Bacterial Cellulose by *Gluconacetobacter hansenii* PJK Isolated From Rotten Apple, (Biotechnol. Bioproc), 83–88.

Laplace Dönüşümü Kullanarak Kriptografinin Yeni Bir Metodunun Kriptanalizi

M.Tuncay Gençoğlu

Fırat Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, 23119 Elazığ, Türkiye
e:mail mt.gencoglu@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 02.01.2017; Kabul/Accepted: 10.05.2017)

Özet

Laplace dönüşüm kriptosistemlerin tasarımında iyi bir uygulama alanı olmasına rağmen, birçok şifreleme algoritması gibi güvenli iletişim için yetersizdir. Kriptografinin yeni bir metodunun kriptozanalizinin yapıldığı bu çalışmada, önerilen şifreleme algoritmasının güvenlik analizinin sadece istatistiksel testlerle gerçekleştirilmesi önemli bir dezavantajdır. Bu kriptozanaliz çalışmasında; Laplace dönüşüm tabanlı şifreleme sistemlerinin güvenlik analizi yapılırken dikkat edilmesi gereken noktalar açıklanmış ve temel matematik kuralları kullanılarak, gizli anahtar bilinmeden, şifre kırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Laplace dönüşümü, Kriptografi, Kriptozanaliz.

Cryptanalysis of a New Method of Cryptography Using Laplace Transform

Abstract

Although Laplace Transform is a good application area in the design of cryptosystems, many cryptographic algorithms are inadequate for secure communication. In this cryptozanalysis study, it is a significant disadvantage that the security analysis of the proposed encryption algorithm is carried out only by statistical tests. In this cryptozanalysis study, when performing security analysis of laplace transformation based encryption systems explaining the need to pay attention to what and using basic mathematical rules, without knowing the secret key, the password was broken.

Keywords: Laplace transform, Cryptography, Cryptozanalysis.

1. Giriş

Laplace dönüşüm sistemi çeşitli şifreleme algoritmalarında kullanılmıştır [1-5]. Ayrıca önerilen algoritmalar için güvenlik analizi istatistiksel testler kullanılarak gösterilmiştir [6,7]. Algoritmanın herhangi bir saldırıya karşı direnci yalnızca anahtar üretiminde kullanılan parametrelerin sayısı ile ilgilidir. Bir kriptos sistemi tasarlanırken zorluğu, şifreleme mimarisinde kullanılan yapıları matematiksel bir modelle hesaplamak ve daha sonra bu yapıların şifreleme açısından güvenli olduğunu kanıtlamaktır. Aslında bir şifreleme planı kriptozanalist bir bakış açısı ile tasarlanırsa bir sonraki adımlarda ortaya çıkabilecek muhtemel problemlerin bazıları giderilebilecektir. Aynı durum Laplace dönüşüm tabanlı şifreleme için de geçerlidir.

Laplace dönüşüm tabanlı bir metin şifreleme algoritması önerilmiştir [2]. Önerilen algoritmanın güvenlik analizleri sadece

istatistiksel testler kullanılarak yapılmıştır. Bu çalışmada Laplace dönüşüm tabanlı kriptosistem tasarımlarının zayıf yönleri modüler aritmetiğin kuralları kullanılarak gösterilmiş ve buradan hareketle önerilen algoritmanın kriptozanalizi yapılmıştır. Önce, kriptozanaliz için genel bir bakış açısı verilmiş, daha sonra anahtar bilinmeden şifreli metinden düz metnin nasıl elde edileceği gösterilmiştir. Son olarak yapılan kriptozanalizin sonuçları verilerek yazarın iddiası çürütülmüştür.

2. Şifreleme Algoritması

Önerilen şifreleme algoritmasının esası; Laplace dönüşümü yardımıyla üretilen yerine koyma metodu ile harflerin şifrelenmesine bağlıdır. Şifreleme işlemi Taylor serisi genişlemesi kullanılarak gerçekleştirilir. Önerilen algoritma simetrik bir şifreleme algoritması olduğundan, başlangıçta gönderici ile alıcı

arasında bir gizli anahtar belirlenmiştir. Şifreleme algoritması adımları aşağıdaki gibidir:

1.Basamak: Şifreleme süreci başlamadan önce, gönderici ve alıcı bir anahtar üzerinde mutabakat sağlarlar.

2.Basamak: Algoritmada kullanılacak Laplace dönüşümü belirlenir. Önerilen şifreleme algoritmasında Taylor serisi kullanılmıştır. (1) nolu denklemde Taylor serisinin genişlemesi verilmiştir. (2) nolu denklem kullanılarak açık metin belirlenmiştir.

$$e^{rt} = 1 + \frac{rt}{1!} + \frac{r^2 t^2}{2!} + \frac{r^3 t^3}{3!} + \dots + \frac{r^n t^n}{n!} + \dots + \dots = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(rt)^n}{n!} \quad (1)$$

Burada $r \in N$ bir sabit olup

$$te^{rt} = t + \frac{rt^2}{1!} + \frac{r^2 t^3}{2!} + \frac{r^3 t^4}{3!} + \dots + \frac{r^n t^{n+1}}{n!} + \dots + \dots = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(rt)^{n+1}}{n!} \quad (2)$$

A'dan itibaren Z'ye kadar harfler 0'dan 25'e kadar sayılarla yer değiştirilmiştir.

3.Basamak: Verilen "PROFESSOR" açık metni 15 17 14 5 4 18 18 14 17 sayılarına eşitlenmiştir.

Bu sabitler

$$G_0 = 15, G_1 = 17, G_2 = 14, G_3 = 5,$$

$$G_4 = 4, G_5 = 18, G_6 = 18, G_7 = 14,$$

$G_8 = 17, G_n = 0$ ($n \geq 9$) şeklinde te^{rt} 'nin katsayıları olarak yazılmış;

$f(t) = Gte^{2t}$ de yerine yazılarak

$$f(t) = t \left[G_0 \cdot 1 + G_1 \cdot \frac{2t}{1!} + G_2 \cdot \frac{2^2 t^2}{2!} + G_3 \cdot \frac{2^3 t^3}{3!} + G_4 \cdot \frac{2^4 t^4}{4!} + G_5 \cdot \frac{2^5 t^5}{5!} + G_6 \cdot \frac{2^6 t^6}{6!} + G_7 \cdot \frac{2^7 t^7}{7!} + G_8 \cdot \frac{2^8 t^8}{8!} \right]$$

$$= \sum_{n=0}^{\infty} \frac{2^n t^{n+1}}{n!} G_n \quad (3)$$

$$= 15 \cdot t + 17 \cdot \frac{2t^2}{1!} + 14 \cdot \frac{2^2 t^3}{2!} + 5 \cdot \frac{2^3 t^4}{3!} + 4 \cdot \frac{2^4 t^5}{4!} + 18 \cdot \frac{2^5 t^6}{5!} + 18 \cdot \frac{2^6 t^7}{6!} + 14 \cdot \frac{2^7 t^8}{7!} + 17 \cdot \frac{2^8 t^9}{8!}$$

elde edilmiştir.

4.Basamak: Her iki tarafın Laplace dönüşümü alınarak

$$L\{f(t)\} = L\{Gte^{2t}\}$$

$$= L \left\{ t \left[G_0 \cdot 1 + G_1 \cdot \frac{2t}{1!} + G_2 \cdot \frac{2^2 t^2}{2!} + G_3 \cdot \frac{2^3 t^3}{3!} + G_4 \cdot \frac{2^4 t^4}{4!} + G_5 \cdot \frac{2^5 t^5}{5!} + G_6 \cdot \frac{2^6 t^6}{6!} + G_7 \cdot \frac{2^7 t^7}{7!} + G_8 \cdot \frac{2^8 t^8}{8!} \right] \right\}$$

$$\frac{15}{s^2} + \frac{68}{s^3} + \frac{168}{s^4} + \frac{160}{s^5} + \frac{320}{s^6} + \frac{3456}{s^7} + \frac{8064}{s^8} + \frac{14336}{s^9} + \frac{39168}{s^{10}} \quad (4)$$

elde edilir.

Elde edilen 15 68 168 160 320 3456 8064 14336 39168 katsayıları düzenlenerek mod 26 daki karşılıkları alınır.

$$15=15 \mod 26, 68=16 \mod 26, 168=12 \mod 26, 160=4 \mod 26, 320=8 \mod 26,$$

$$3456=24 \mod 26, 8064=4 \mod 26,$$

$$14336=10 \mod 26, 39168=12 \mod 26.$$

5.Basamak: Gönderici mod işlemindeki bölümleri, 0 2 6 6 12 132 310 351 1506, anahtar olarak gönderir.

$$G_0' = 15, \quad G_1' = 16, \quad G_2' = 12, \\ G_3' = 4, \quad G_4' = 8, \\ G_5' = 24, \quad G_6' = 4, \\ G_7' = 10, \quad G_8' = 12, \\ G_n' = 0 \quad (n \geq 9)$$

Verilen açık metin 15 16 12 4 8 24 4 10 12 şifreli metnine dönüştürülür. Böylece

“PROFESSOR” mesajı “PQMEIYEKM”
şekline dönüştürülmüştür.

3. Kriptanaliz İçin Genel Bir Bakış

1.Durum: Şifreleme planında kullanılan yapılar matematiksel bir modelle belirtilmelidir. Modelin daha basit denklemler tarafından ifade edilmesi için araştırılması gerekiyorsa ya da mümkün değilse, cebirsel bağımlılıklar açıklanmalıdır.

2.Durum: Şifreleme sisteminin bilinen saldırılara dayanıklı olduğu gösterilmelidir. Taylor serisinin genişlemesi ve modüler aritmetiğin esasları uyarınca; metin şifrelenir ve şifresi çözülür.

3.Durum: Şifreleme algoritmasının güvenliği, seçilen anahtar alanına bağlıdır. Anahtar tasarım algoritması matematiksel olarak ifade edilmelidir. Tasarımdan kaynaklanan zayıf anahtarların varlığı araştırılmalıdır.

4.Durum: Şifreleme mimarisinde kullanılan Laplace dönüşümünün özellikleri ayrıntılı bir şekilde incelenmelidir. Unutulmamalıdır ki, şifreleme sistemlerinin karışıklık ve yayılma özelliklerinin, şifreleme planında kullanılan Laplace'de güvenli bir şekilde sağlanması gerekir.

5.Durum: Laplace Dönüşümü ve modları gerçekleştirilirken bölme kuralları nedeniyle ortaya çıkabilecek sorunlar araştırılmalıdır. Çok kuvvetli yapılar kullanılsa da, en küçük açıklığın tüm sistemi etkileyebileceği düşünülerek tasarıma yönelik özel saldırılar araştırılmalıdır.

4. Kriptanaliz

Bu bölümde, bir önceki bölümde verilen kriptanalist bakış kullanılarak Laplace tabanlı metin şifreleme algoritmasının [2] kriptanalizinin nasıl yapılacağı gösterilmiştir. Burada, şifreleme algoritması denklem (5) de gösterildiği gibi basit bir matematiksel model ile ifade edilmiştir. Önerilen algoritmada, rakamların kodlanmış bir metne ve modüler aritmetiğe karşılık geldiği belirtilmektedir. Şifre, modüler aritmetik kurallarına göre

çözüldüğünden, gizli anahtarı bilmeye gerek yoktur. Sayılar arasındaki bağımlılıkların varlığı şifreleme bağlamına karşılık gelir ve modüler aritmetiğin dezavantajlarından biridir.

$$L \left\{ \sum_{n=0}^{\infty} \frac{2^n t^{n+1}}{n!} G_n \right\} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{2^n t^{n+1} \cdot (2i+3)!}{n! \cdot s^{n+2}} G_n \quad (5)$$

Şifreli metin bu yöntem ile aşağıdaki gibi dönüştürülür;

“PQMEIYEKM” → 15 16 12 4 8 24 4 10 12

Daha sonra

$$G_0 \cdot \frac{1!}{0!s^2} + G_1 \cdot \frac{2^1 \cdot 2!}{1!s^3} + G_2 \cdot \frac{2^2 \cdot 3!}{2!s^4} + G_3 \cdot \frac{2^3 \cdot 4!}{3!s^5} + G_4 \cdot \frac{2^4 \cdot 5!}{4!s^6} + G_5 \cdot \frac{2^5 \cdot 6!}{5!s^7} + G_6 \cdot \frac{2^6 \cdot 7!}{6!s^8} + G_7 \cdot \frac{2^7 \cdot 8!}{7!s^9} + G_8 \cdot \frac{2^{10} \cdot 9!}{8!s^{10}} \quad (6)$$

Mod işlemi gereği G_n ler 25'den büyük olamazlar. Buradan hareketle;

$$G_0 \cdot 1 = 26 \cdot K_0 + 15 \Rightarrow G_0 = \frac{26 \cdot K_0 + 15}{1} \Rightarrow \left\{ K_0 = 0 \text{ için } G_0 = 15 \right.$$

$$G_1 \cdot 4 = 26 \cdot K_1 + 16 \Rightarrow G_1 = \frac{26 \cdot K_1 + 16}{4} \Rightarrow \left\{ K_1 = 2 \text{ için } G_1 = 17 \right.$$

$$G_2 \cdot 12 = 26 \cdot K_2 + 12 \Rightarrow G_2 = \frac{26 \cdot K_2 + 12}{12} \Rightarrow \left\{ K_2 = 6 \text{ için } G_2 = 14 \right.$$

$$G_3 \cdot 32 = 26 \cdot K_3 + 4 \Rightarrow G_3 = \frac{26 \cdot K_3 + 4}{32} \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} K_{3,0} = 22 \text{ için } G_{3,0} = 18 \\ K_{3,1} = 6 \text{ için } G_{3,0} = 5 \end{array} \right.$$

$$G_4.80 = 26.K_4 + 8 \Rightarrow G_4 = \frac{26.K_4 + 8}{80}$$

$$\Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} K_4 = \mathbf{12} \text{ için } G_4 = \mathbf{4} \end{array} \right.$$

$$G_5.192 = 26.K_5 + 24 \Rightarrow G_5 = \frac{26.K_5 + 24}{192}$$

$$\Rightarrow \{ K_5 = \mathbf{132} \text{ için } G_5 = \mathbf{18} \}$$

$$G_6.448 = 26.K_6 + 4 \Rightarrow G_6 = \frac{26.K_6 + 4}{448}$$

$$\Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} K_6 = \mathbf{310} \text{ için } G_6 = \mathbf{18} \end{array} \right.$$

$$G_7.1024 = 26.K_7 + 10 \Rightarrow G_7 = \frac{26.K_7 + 10}{1024}$$

$$\Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} K_7 = \mathbf{551} \text{ için } G_7 = \mathbf{14} \end{array} \right.$$

$$G_8.2304 = 26.K_8 + 12 \Rightarrow G_8 = \frac{26.K_8 + 12}{2304}$$

$$\Rightarrow K_8 = \mathbf{1506} \text{ için } G_8 = \mathbf{17}$$

değerleri bulunur ve

15 17 14 5 4 18 18 14 17 → “PROFESSOR”
açık metnine ulaşılır.

5. Sonuç

Hiwarekar tarafından simetrik bir şifreleme algoritması önerilmiştir [2]. Önerilen

algoritmada, gönderen ile alıcı arasındaki şifreli metin, modüler aritmetik kullanılarak çözülmüştür. Yani, anahtarı bilmeden, şifreli algoritma yalnızca şifreli metni görerek, basit bölünebilme ve modül teorisi ile bir bilgisayar olmadan kırılmıştır. Bu ise yazarın kırılması imkânsız bir algoritma ürettiği iddiasını çürütmektedir.

6. Kaynaklar

1. Bodkhe D.S, Panchal S.K. (2015). Use of Sumudu Transform in Cryptography, Bulletin of the Marathwada Mathematical society, 16/2: 1-6.
2. Hiwarekar A.P. (2012). A new method of cryptography using Laplace transform, International Journal of Mathematical Archive, 3/3 : 1193-1197.
3. Hiwarekar A.P. (2013). A new method of cryptography using Laplace transform of Hyperbolic functions, International Journal of Mathematical Archive, 4/2 : 208-213.
4. Lakshmi G.N, Kumar B.R, Sekhar A.C. (2011). A cryptographic scheme of Laplace transforms, International Journal of Mathematical Archive, 2/12: 2515-2519.
5. Gençoğlu M.T. (2016). Use of Integral Transform in Cryptology, Science and Eng.J of Firat Univ., 28/2: 217-220.
6. Ge X, Liu F, Lu B, Yang C. (2010). Improvement of Rhoema's attacks on Gao algorithm, Physics Letters A, 374: 1362-1367.
7. Sakallı M. T, Aslan B. (2014). On the algebraic construction of cryptographically good 32×32 binary linear transformations, Journal of Computational and Applied Mathematics, 259 : 485-494.

Demiryolu Hattında Oto-Korelasyon Tabanlı Makas Geçişi ve Ray Yüzeyi Durum İzleme Yöntemi

Orhan Yaman¹, Mehmet Karaköse², İlhan Aydın³, Erhan Akın⁴

^{1,2,3,4}Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Fırat Üniversitesi, Elazığ 23119

¹orhanyaman@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 02.02.2017; Kabul/Accepted: 28.04.2017)

Özet

Demiryolu ulaşımı yolcu ve kargo taşımacılığında oldukça yaygın olarak kullanılan bir ulaşım türüdür. Raylı ulaşım araçlarının gelişmesiyle birlikte son yıllarda oldukça fazla tercih edilmektedir. Demiryolu araçları ray hattını kullanarak ulaşımını sağlamaktadırlar. Ray hattında oluşabilecek arızalar büyük kazalara neden olmaktadır. Bu çalışmada, makas geçişleri ve ray yüzeyi tespiti yapılarak ray yüzeylerinde oluşan arızalar tespit edilmektedir. Önerilen yöntemde dört adet yüksek hızlı kamera kullanılmaktadır. Kameralardan alınan görüntüler eş zamanlı işlenerek özellik çıkarımı yapılmaktadır. Görüntü üzerinde her bir sütun için öz ilişki (autocorrelation) değeri hesaplanarak öznelik sinyali elde edilmektedir. Öznelik sinyali üzerinde sinyal işleme yapılarak özellik çıkarımı yapılmıştır. Özellik çıkarımının ardından ray yüzeyi ve makas tespiti edilmektedir. Elde edilen ray yüzeyi görüntüleri incelenerek ray yüzeyinde oluşan arızalar tespit edilmektedir. Bu çalışmada yüksek hızlara sahip dört adet kamera eş zamanlı kullanılmıştır. Önerilen yöntemin performansı yüksek olduğundan gerçek zamanlı çalışmaktadır.

Anahtar kelimeler: Demiryolu, Öz ilişki, Demiryolunda makas tespiti, Durum İzleme

Autocorrelation Based Switch Crossing and Rail Surface Tracking Method in Railway Line

Abstract

Railway transportation is a type of transportation that is frequently used in passenger and cargo transportation. Along with the development of rail transport vehicles, it is highly preferred in recent years. Railway vehicles provide access to railway lines. Defects that can occur in the railway line are causing great accidents. In this study, defects occurring on the rail surfaces are detected by making rail switch and rail surface detection. In the proposed method, four high-speed cameras are used. The images taken from the cameras are processed concurrently and feature extraction is performed. The auto-correlation value is calculated for each column on the image to obtain the feature signal. Feature extraction is done by signal processing on the attribute signal. The rail surface and rail switch are detected after the feature extraction. By examining the obtained rail surface images, defects occurring on the rail surface are detected. In this study, four cameras with high speeds were used simultaneously. Since the proposed method has high performance, it works in real time.

Keywords: Railway, Autocorrelation, Switch detection in railway, Condition monitoring

1. Giriş

Demiryolu ulaşımı günümüzde önemli bir ulaşım türüdür. Teknolojinin yeni gelişmeye başladığı yıllardan itibaren demiryolu araçları ulaşım ve yük taşımacılığında kullanılmıştır. Son yıllarda hızlı trenler geliştirilerek yolcu taşımacılığında önemli bir konuma gelmiştir. Ayrıca ağır yükleri taşıyabilme özelliğinden dolayı yük taşımacılığında da oldukça kullanılmaktadır. Demiryolu ulaşımının ucuz ve güvenilir olması insanlara cazip gelmiştir [1-3].

Demiryolu araçlarında ve ray hattında yapılan teknolojik yenilikler sayesinde, insanlar demiryolu ulaşımını daha da kullanmaya başlamıştır. Böylelikle demiryolu araçlarının sayısı artmıştır. Şehir içi ve şehirlerarası ulaşımında birden fazla tren bir ray hattını kullanabilmektedir. Demiryolu trafiğinin kontrol edilmesi, birden fazla trenin tek bir ray hattını kullanarak ulaşımı sağlaması oldukça önemlidir. Bu işlemler için demiryolu hattında makas geçişleri mevcuttur. Makas geçişleri, bir veya birden fazla ray hattını birbirine bağlayarak,

trenlerin hatlar arası geçişlerini sağlamaktadır. Makas geçişleri demiryolu hattı için çok önemlidir [4]. Demiryolu bileşenlerinde oluşabilecek bir arıza büyük kazalara neden olabilmektedir. Ayrıca ulaşımın aksamasına, maddi kayıplar oluşabilmektedir. Demiryolu bileşenlerinde oluşabilecek arızaların erken teşhis edilmesi ve bakım onarımı yapılarak, kazaların, ulaşım aksamasının ve maddi kayıpların önüne geçilebilmektedir.

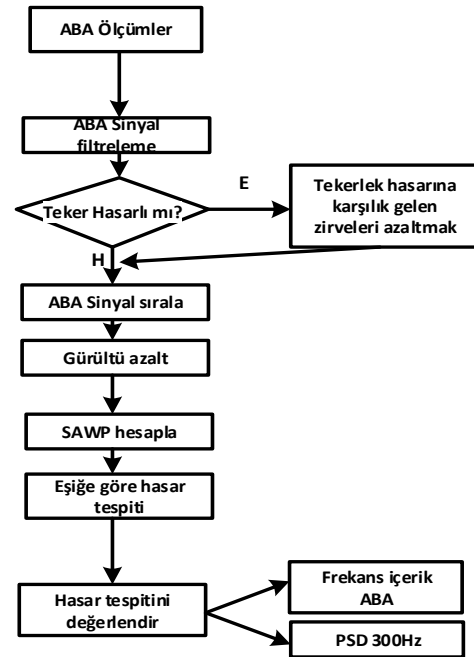
Literatürde demiryolu hattı bileşenleri için durum izleme ve arıza tespit yaklaşımları mevcuttur. Yapılan çalışmalar incelendiğinde genel olarak iki türlü yaklaşımın olduğu görülmektedir. Temaslı durum izleme yöntemlerinde, geliştirilen araçlar demiryolu hattını tarayarak oluşan arızaları tespit etmektedir [5,6]. Fakat bu yöntem kullanılırken sürekli demiryolu bileşenlerine temas ettiğinden dolayı arıza oluşturabilmektedir. Ayrıca temaslı durum izleme yöntemi uygulanırken demiryolu trafiği aksamaktadır. Bu durum istenmediğinden bu tür yöntemler yaygın olarak kullanılmamaktadır. Diğer bir yöntem olan temassız durum izleme yönteminde ise genellikle kameralar kullanılarak görüntü işleme tabanlı durum izleme yapılmaktadır. Demiryolu araçlarının üzerinde sabitlenen kameralar sayesinde trenin hareketi halinde demiryolu hattını izlemekte ve arıza teşhisi yapmaktadır. Temassız durum izleme yöntemleri ray hattında hiçbir şekilde temas etmemektedir [7-11]. Uygulanması sırasında demiryolu araçlarının üzerine sabitlendiği için trafiği de aksatmamaktadır.

Johansson ve diğ. [12] makas geçişi sırasında sürtünme ve aşınmadan kaynaklanan aşınma arızalarının tespiti için bir çalışma yapmıştır. Çalışmada demiryolu makas bileşenleri izlenmektedir. Makas geçişi sırasında tekerin raya temas etmesini benzetim ile modellemiştir. Modelleme sonucunda raya gelebilecek yüklere göre gözlem yapmıştır. Boccione ve diğ. [13] ray yüzeyinde oluşan arızaların tespiti için sinyal işleme tabanlı bir yöntem önermiştir. Önerilen yöntemde trenin demiryolu hattında gitmesi sırasında ortaya çıkardığı titreşim sinyalleri kullanılmıştır. Titreşim sinyalleri üzerinden sinyal işleme yöntemleri geliştirilerek arıza tespiti yapılmaktadır. Palsson [14] demiryollarında makas geçiş bölümlerinde optimizasyon üzerine tez çalışması tamamlamıştır. Bu tez çalışmasında

makas geçiş bileşenleri izlenerek bu bileşenlerde oluşan arızalar incelenmiştir. Makas geçişleri sırasında makas bölgelerinde oluşan değişimler gözlemlenmiştir. Bir raydan başka bir raya olan yük dağılımı incelenmiştir. Bu çalışmalardan başka ray yüzeyi ve bileşenlerinde oluşan arızaların tespiti için birçok çalışma yapılmıştır.

Maria ve diğ. [15] Demiryolu hattında ray yüzeyi arızalarının tespiti için titreşim tabanlı bir yöntem önermiştir. Trenin tekerinin üzerine titreşim sensörü yerleştirilerek demiryolu hattı boyunca sinyal elde etmiştir. Elde edilen sinyaller üzerine dalgacık dönüşümü kullanarak ray yüzeyinde oluşan arızaları tespit etmiştir. Kullandığı yöntemin akış şeması Şekil 1'de verilmiştir.

Ashwani ve diğ. [16] demiryolu ray arızalarının tespiti için görüntü segmentasyonu tabanlı bir yöntem önermiştir. Maksimum Kararlı Ekstremal Bölge İşareti (MSER) yöntemi kullanarak ray yüzeyinde oluşan arızaları tespit etmiştir. Önerilen yöntemin akış şeması Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 1. Literatür akış şeması [15]



Şekil 2. Literatürde önerilen yöntemin akış şeması [16]

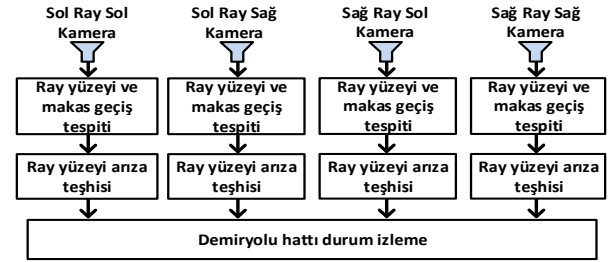
Pavel [17] yapmış olduğu doktora çalışmasında demiryolu hattında bileşen tespiti ve arıza tespiti yapmıştır. Demiryolu ray yüzeyi ve bağlantı elemanlarını tespit ederek bu bileşenlerde oluşan arızaları, şekilsel bozuklukları tespit etmektedir.

Bu çalışmada, demiryolu makas geçişi tespiti ve ray yüzeyi tespiti yapılmaktadır. Tespit edilen ray yüzeylerinde oluşan arızalar teşhis edilmektedir. Önerilen yöntemde dört adet kamera kullanarak demiryolu hattında görüntüler alınmıştır. Alınan görüntüler üzerinde öz ilişki değeri hesaplanarak görüntülerden özellik çıkarımı yapılmıştır. Özellik çıkarımı sonucunda her bir görüntü için sinyal elde edilmiştir. Elde edilen sinyaller üzerinde basit sinyal işleme yöntemleri kullanılarak ray yüzeyi ve makas geçiş tespiti yapılmaktadır. Tespit edilen ray yüzeyleri ana görüntüden kesilerek ray yüzeyi arıza teşhisi yapılmaktadır. Ray yüzeyi görüntüsünde ise öz ilişki değeri kullanılarak sinyal elde edilmektedir. Elde edilen sinyaller işlenerek ray yüzeyi durum izleme ve arıza teşhisi yapılmaktadır. Önerilen yöntem sinyal işleme tabanlı bir yöntem olduğu için görüntü işleme yöntemlerine göre oldukça hızlıdır. Literatürde ki mevcut çalışmalar incelendiğinde genellikle görüntü işleme kullanılarak demiryolu hattında durum izleme ve arıza teşhisi yapılmıştır. Bu çalışmada ise kameradan alınan görüntüler doğrudan özellik çıkarımı yapılarak sinyale dönüştürülmektedir. Elde edilen sinyaller

üzerinde sinyal işleme yöntemi geliştirilerek ray yüzey ve makas geçiş tespiti yapılmıştır. Ayrıca tespit edilen ray yüzeylerinde oluşan arızalar da tespit edilebilmektedir.

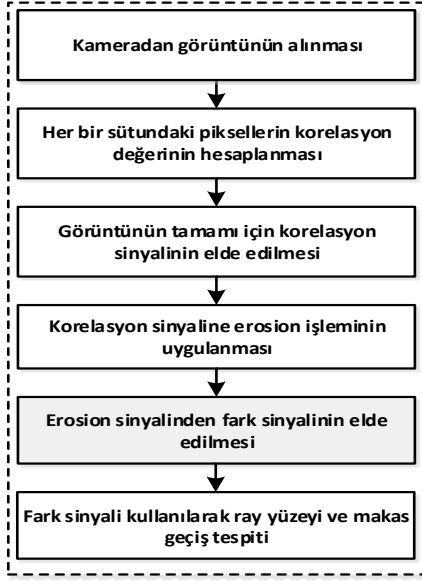
2. Önerilen Yöntem

Önerilen yöntemde, dört adet çerçeve kamera kullanılarak görüntüler alınmıştır. Kullanılan kameralar yüksek fps (frame per second) özelliğine sahip kameralardır. Kameralardan alınan her bir görüntü için ray yüzeyi ve makas geçişi tespit yöntemi uygulanmaktadır. Tespit edilen ray yüzeyi görüntülerinden ray yüzey arızası tespiti yapılmaktadır. Dört kameradan alınan görüntüler için sonuçlar çıkarılarak demiryolu hattı durum izlemesi yapılmaktadır. Önerilen yöntemin blok yapısı Şekil 3'te verilmiştir.

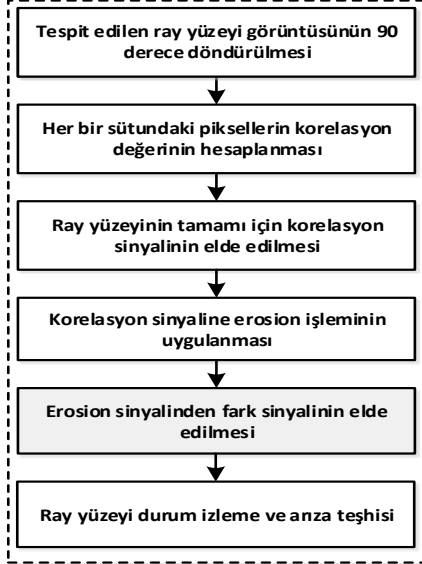


Şekil 3. Önerilen yöntemin blok şeması

Şekil 3'te verilen önerilen yöntemin blok şemasında dört adet kamera kullanarak demiryolu ray görüntüleri elde edilmektedir. Önerilen yöntemin en büyük avantajlarından biri sinyal işleme tabanlı bir yöntem olmasıdır. Sinyal işleme tabanlı bir yöntem olduğu için oldukça hızlıdır. Böylece yüksek fps özelliklerine sahip kameralar için kullanışlı bir algoritmadır. Ray yüzey ve makas geçiş tespit yönteminin akış şeması Şekil 4.a'da, ray yüzey arıza teşhis yönteminin akış şeması Şekil 4.b'de verilmiştir.



a)

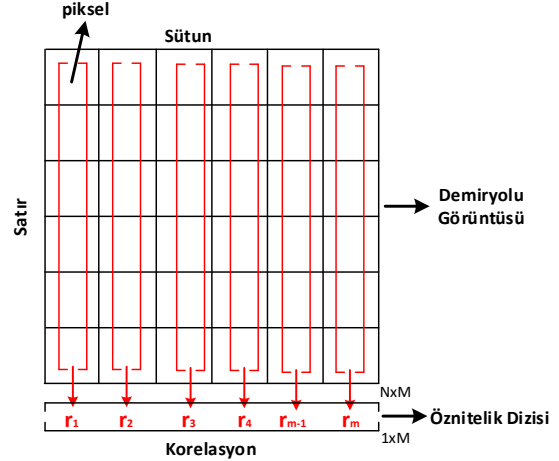


b)

Şekil 4. Önerilen yöntemin akış şeması a) Ray yüzeyi ve makas geçişi tespiti b) Ray yüzey arıza tespiti

Önerilen yöntemde kameradan alınan görüntüler üzerinde öz ilişki değerleri hesaplanarak bir sinyal elde edilmektedir. Şekil 5'te bir görüntüden öz ilişki değeri hesaplanarak öznitelik dizisinin elde edilmesi verilmiştir.

Bir görüntüden öznitelik dizisi oluşturulurken Şekil 5'te ki gibi görüntüdeki her bir sütuna ait tüm satırlar kullanılarak o sütun için öz ilişki değeri hesaplanmaktadır. Öz ilişki görüntü üzerindeki tekrarlı yapıları inceleyen bir yöntemdir [18]. Öz ilişki değerinin hesaplanması denklem 1'de verilmiştir.



Şekil 5. Görüntüden öz ilişki değeri hesaplanarak öznitelik dizisinin elde edilmesi

$$r_i(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{t=0}^{N-\tau-1} x(t+\tau)x(t) \quad (1)$$

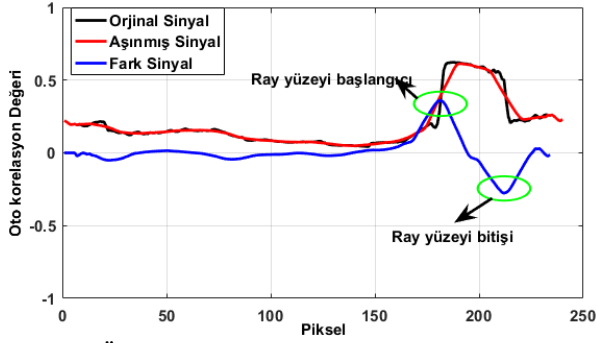
N toplam örnek sayısını yani her sütundaki toplam satır sayısını, t zamanı, Γ zamandaki kaydırma değerini, x normalize edilmiş sinyal değerini ve r ise öz ilişki değerini göstermektedir. Görüntü üzerinde her bir sütundaki tüm satırlar tek boyutlu bir dizi olarak kullanılır. $r_i(\tau)$ değeri ($i=1, 2, 3, \dots, M$) her sütun için hesaplanır. Böylece öz ilişki işlemi, görüntü üzerine uygulanarak öznitelik sinyali elde edilmiştir. Öznitelik sinyalinde gürültülerin yok edilmesi ve sinyalin daha da düzenlenmesi için aşımma işlemi uygulanmaktadır. Aşımma işlemi denklem 2'de verilmiştir.

$$x(t) = (x(t-2) + x(t-1) + x(t) + x(t+1) + x(t+2)) / 5 \quad (2)$$

Aşımma işleminin ardından ray yüzey ve makas tespiti için fark sinyali elde edilmektedir. Fark sinyali elde edilirken denklem 3 kullanılmıştır.

$$x(t) = |x(t+7) - x(t-7)| \quad (3)$$

Fark sinyali elde edildikten sonra, sinyalde pozitif yönde oluşan tepe noktaları ray yüzeyi başlangıcı negatif yönde oluşan tepe noktası ise ray yüzeyi bitişi olarak adlandırılmaktadır. Örnek bir görüntüden elde edilen öznitelik sinyali, aşımma sinyali ve fark sinyali Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. Örnek bir görüntüden elde edilen sinyaller ve ray yüzeyinin tespit edilmesi

Ray yüzeyi tespit etme işleminin ardından ray yüzeyinde oluşan arızaların tespiti ve durum izleme için benzer algoritma kullanılmaktadır.

3. Deneyisel Sonuçlar

Bu çalışmada deneyisel görüntülerin alınmasında Alied vision üreticili Mako G032B/C model kameralar kullanılmıştır. Kullanılan kameraların ve lenslerin görüntüsü Şekil 7’de verilmiştir.



Şekil 7. Bu çalışmada kullanılan kamera ve lens a) Kamera b) Lens

Şekil 7’de verilen kameranın özellikleri Tablo 1’de verilmiştir.

Demiryolu hattına ait görüntülerin elde edilebilmesi için bir demiryolu aracı oluşturulmuştur. Oluşturulan demiryolu aracının üzerinde dört adet kamera, bilgisayar ve UPS yerleştirilmiştir. Oluşturulan deneyisel düzenek Şekil 8’de görülmektedir.

Tablo 1. Bu çalışmada kullanılan kameranın genel özellikleri

Üretici	Allied Vision	Model:	Mako G-032B/C
Çözünürlük	658(h) 492(v)	Sensor Boyutu (inch)	1/3
fps (frame per second)	102	Sensor Tipi	CCD
Pixel Boyutu (µm)	7.4(h) 7.4(v)	A/D Bits:	12
Toplam Pixel	323,736	Renk /B & W	Color / B&W
Sensor Cihazı	Sony ICX424	Arayüz	GigE

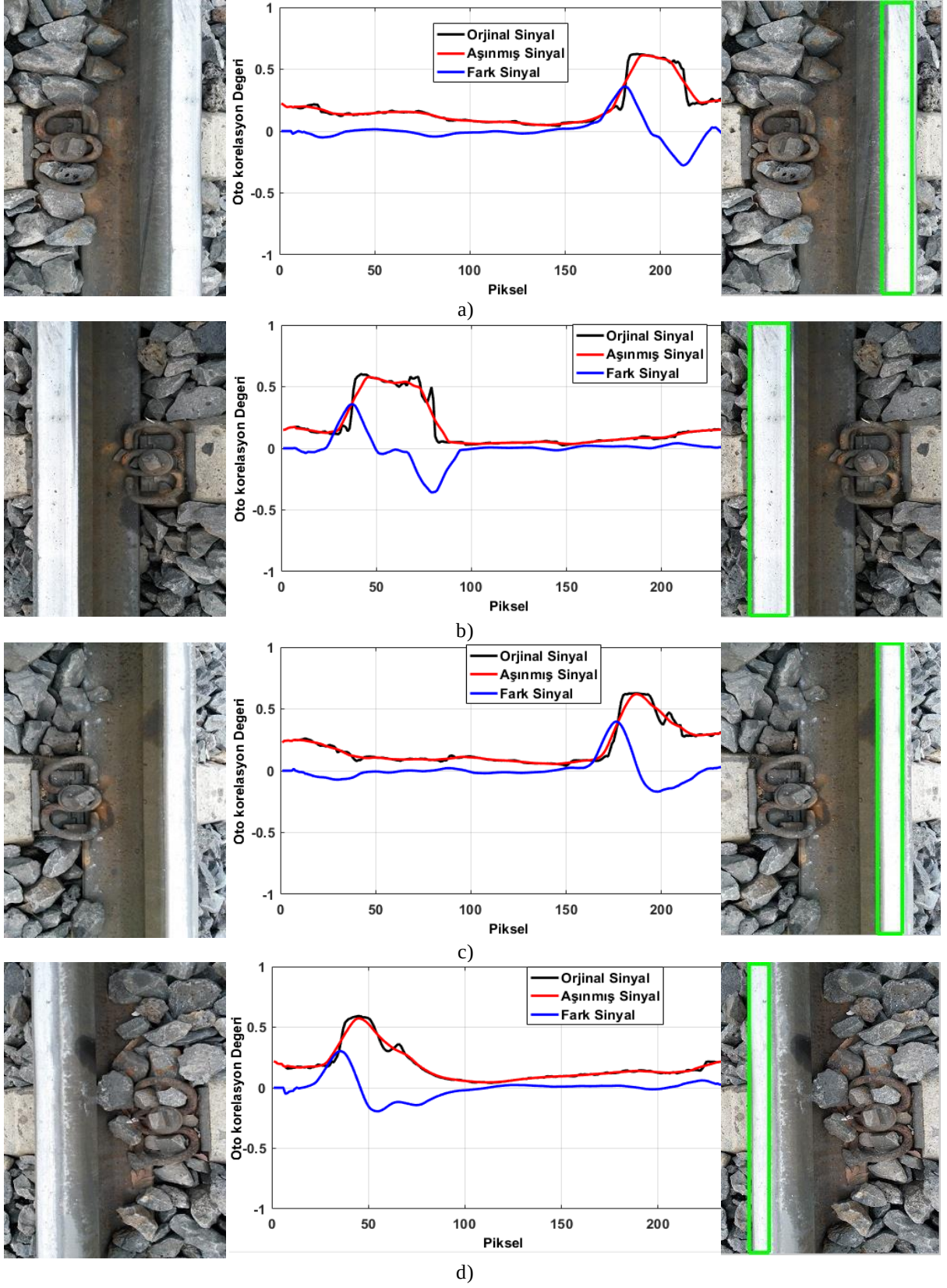
Şekil 8’de verilen deneyisel düzenek demiryolu hattının trafiğe kapalı olduğu zaman hat üzerine yerleştirilerek görüntüler alınmıştır. MATLAB ortamında geliştirilen yazılımlar ile dört adet kameradan görüntüler alınmaktadır. Kameralar, ethernet kabloları ile bilgisayar kasasına takılı olan Frame Grabber kartına bağlanmıştır. Her bir kameradan ortalama 60 Fps görüntü alınarak Frame Grabber kartı aracılığıyla bilgisayara iletilmektedir.



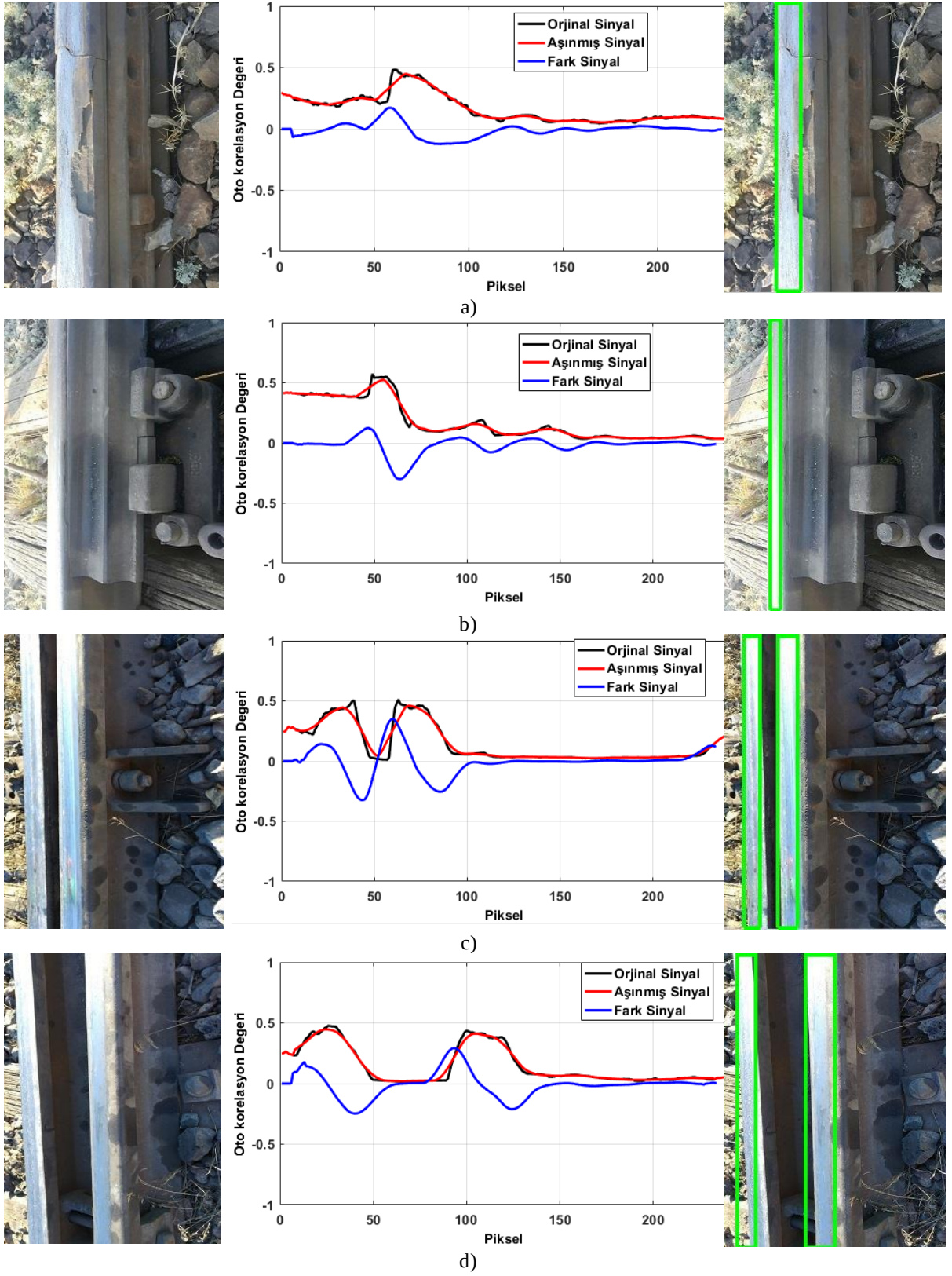
Şekil 8. Bu çalışmada kullanılan deneyisel düzenek

3.1. Ray yüzeyi ve makas geçiş tespiti yaklaşımı sonuçları

Ray yüzeyi ve makas geçiş tespiti yöntemi demiryolu hattında gerçek zamanı çalıştırılarak test edilmiştir. Dört adet kameradan alınan örnek görüntüler Şekil 9’da verilmiştir.



Şekil 9. Dört kameradan alınan örnek görüntüler ve elde edilen sonuçlar a) Sol ray sol kamera b) Sol ray sağ kamera c) Sağ ray sol kamera d) Sağ ray sağ kamera



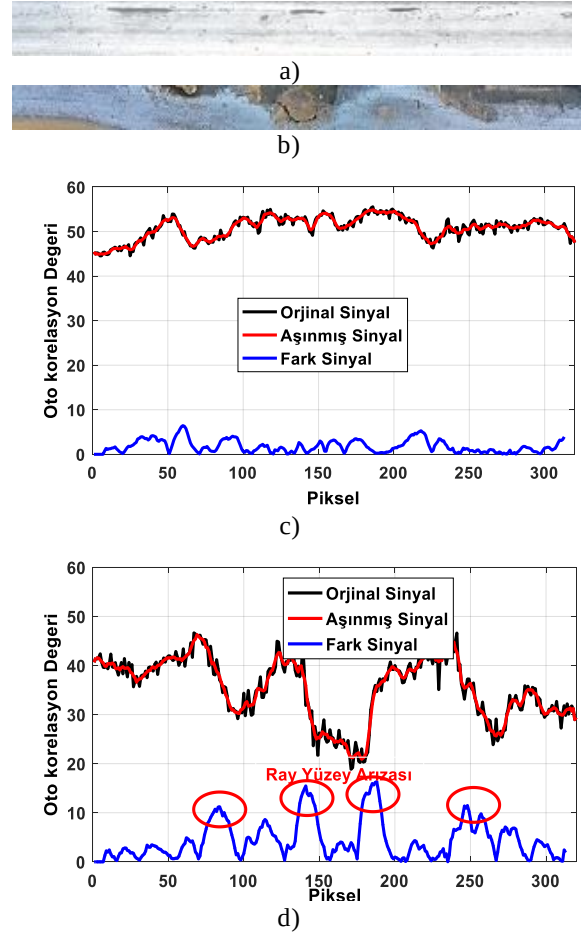
Şekil 10. Ahşap traverse sahip demiryolu hattında makas tespiti örneği a) 1780. Çerçeve b) 1900.Çerçeve c) 2130. Çerçeve d) 2300. Çerçeve

Şekil 9'da verilen görüntüler beton travese sahip demiryolundan elde edilmiştir. Şekil 9.a,b,c ve d'de görüldüğü üzere dört görüntüde de doğru bir şekilde ray yüzeyi tespit edilmiştir. Her bir görüntüye ait öz ilişki değeri hesaplanarak öznelik sinyalleri elde edilmiştir. Elde edilen bu sinyaller üzerinde sinyal işleme yapılarak fark sinyali elde edilmiştir. Fark sinyalinde oluşan pozitif ve negatif yönde artışın tepe noktaları arası ray yüzeyini ifade etmektedir. Önerilen yöntemde makas geçişi tespiti yapılırken sinyalde ki tepe noktaları dikkate alınmaktadır. Görüntü üzerinde eğer birden fazla ray yüzeyi tespit edilmiş ise makas geçişi olduğu bilinmektedir. Şekil 10'da ahşap traverse sahip demiryolu hattında farklı çerçevelerden alınan görüntüler üzerinde makas tespiti yapılmaktadır.

Şekil 10'da farklı çerçevelerden alınan görüntüler üzerinde makas geçişi tespit edilmiştir. Şekil 10.a'da normal bir demiryolu hattı görüntüsü bulunmaktadır. Henüz makas geçiş bölgesine gelinmemiştir. Şekil 10.b'de ise tam makas geçiş bölgesine yaklaşıldığı görüntüde fark edilmektedir. Ama iki ray net olarak görülmektedir. Sadece ana ray görülmektedir. Şekil 10.c'de makas geçiş bölgesindedir. İki ray kolaylıkla tespit edilmiştir. İki ray birbirine oldukça yakındır. Şekil 10.d'de ise makas geçiş bölgesidir. Makas geçişi başarıyla tespit edilmiştir. İki ray arası mesafenin arttığı görülmektedir.

3.2. Ray yüzeyi arıza teşhis yaklaşımı sonuçları

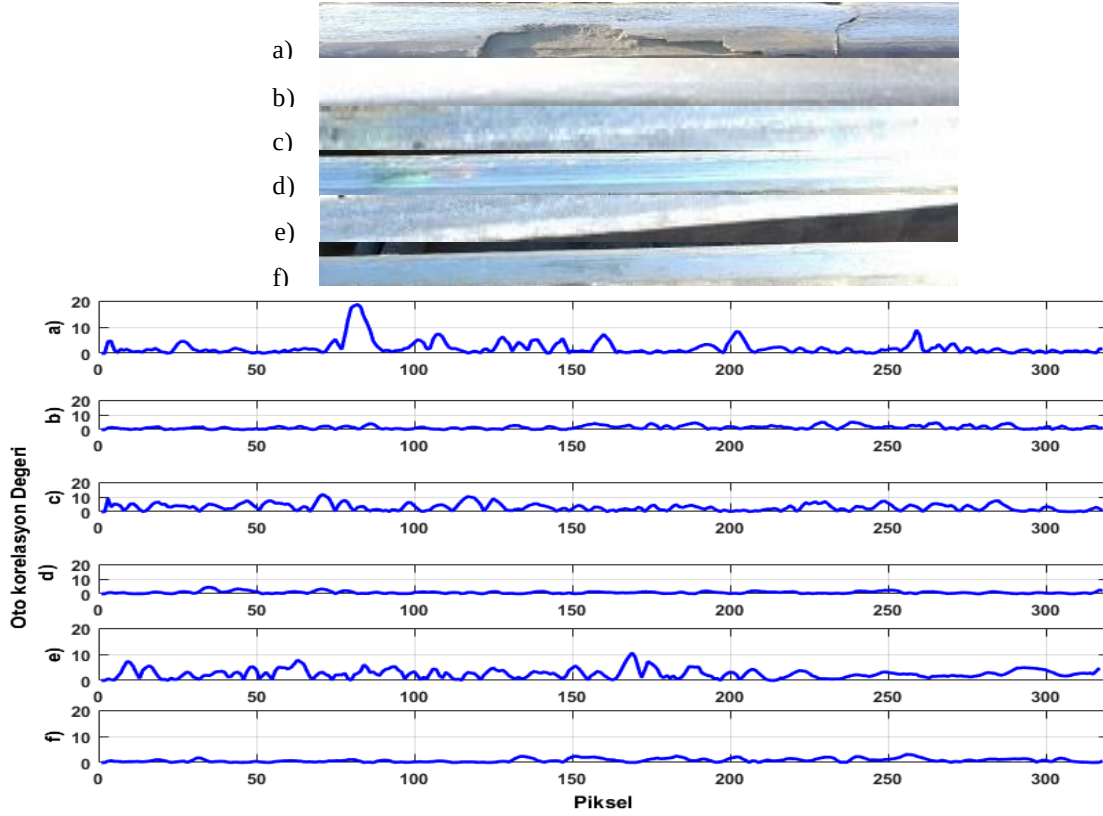
Ray yüzeyi tespiti yönteminde ray yüzeyi bölgesi tespit edildikten sonra görüntüden kesilip alınmaktadır. Alınan görüntü 90 derece döndürülerek ray yüzeyi arıza teşhis algoritması ile birlikte kullanılmaktadır. Ray yüzeyi arıza teşhis yöntemi ile ray yüzeyi tespit yöntemi oldukça benzerdir. Ray yüzeyi görüntüsünün öz ilişki değerleri hesaplanarak öznelik sinyali elde edilmiştir. Elde edilen sinyal üzerinde aşınma yapıldıktan sonra fark sinyali elde edilmektedir. Fark sinyalinde oluşan tepe noktaları ray yüzeyi arızası olarak bilinmektedir. Tepe noktasının yüksekliği ise arızanın boyutunu göstermektedir. Şekil 11'de sağlam ve arızalı ray yüzeyi görüntüleri ve sonuçları verilmiştir.



Şekil 11. Sağlam ve arızalı ray yüzeyi görüntüleri ve sonuçları

Şekil 11.a'da verilen sağlam ray yüzeyi görüntüsüne ait sonuçlar Şekil 11.c'de verilmiştir. Sinyalde de görüldüğü üzere ani değişimler oluşmamıştır. Böylece ray yüzeyi sağlam olduğu görülmektedir. Şekil 11.b'de verilen arızalı ray yüzeyi görüntüsüne ait sonuçlar Şekil 11.d'de verilmiştir. Şekil 11'de verilen sinyallerde üç noktada ani değişimlerden dolayı tepe noktası oluşmuştur. Tepe noktaları incelendiğinde görüntüde de aynı piksel aralığında arıza olduğu görülmektedir.

Şekil 10'da verilen örnek görüntülerde tespit edilen ray yüzey görüntüleri Şekil 12'de kullanılarak ray yüzeyi durum izleme yapılmıştır.



Şekil 12. Örnek ray yüzeyi görüntüleri kullanılarak ray yüzeyi arıza teşhisi ve ray yüzeyi durum izleme yapılması

Şekil 12’de altı adet ray yüzeyi görüntüsü ve elde edilen sonuçlar verilmiştir. Şekil 12.a’da ray yüzeyi arızası olduğu görülmektedir. Şekil 12.a’ya ait grafiğe bakıldığında 50 ile 100 pikselleri arasında tepe noktası olduğu görülmektedir. Bu durum da Şekil 12.a’da ki görüntüde ray yüzeyi arızası olduğu görülmektedir. Diğer ray yüzeyi görüntüler ise sağlam görüntülerdir. Şekil 12.e ve f’de verilen ray yüzey görüntüleri makas geçiş bölgesinde elde edildiğinden dolayı ray yüzeyi düz bir şekilde kesilip alınmamıştır. Fakat yine de ray yüzeyi durum izleme başarıyla yapılmış ve sağlam ray yüzeyi olduğu görülmektedir. Önerilen yöntemin çalışma performansı Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo2’den de görüldüğü üzere önerilen yöntem oldukça hızlı bir yöntemdir. Yapılan performans testi i5 işlemcili 2,60 Ghz, 8 GB RAM ve 64 bit işletim sistemine sahip bir bilgisayarda yapılmıştır. Dört adet kamera paralel çalıştırılarak her bir kameradan yaklaşık 60 fps görüntü alınmıştır.

Tablo 2. Önerilen yöntemin çalışma performansı

	Ray yüzeyi ve makas tespiti ortalama (ms)	Ray yüzeyi ve makas tespiti standart sapma (ms)	Ray yüzeyi durum izleme ortalama (ms)	Ray yüzeyi durum izleme standart sapma (ms)
Kamera 1	11,16	0,77	7,84	0,19
Kamera 2	11,21	0,75	7,79	0,16
Kamera 3	11,09	0,78	7,92	0,22
Kamera 4	11,12	0,79	7,80	0,20
Ortalama	11,14	0,77	7,83	0,19

4. Sonuçlar

Demiryolu hattında oluşabilecek arızaların erken teşhis edilmesi oldukça önemlidir. Günümüzde demiryolu arızalarının erken teşhisi ve durum izleme için birçok çalışma mevcuttur. Bu çalışmada dört kamera kullanılarak demiryolu ray yüzey ve makas tespiti yapılmaktadır. Tespit edilen ray yüzeyine ait durum izleme ve arıza teşhisi yapılmaktadır. Önerilen yöntemin en büyük avantajı hızlı olmasıdır. Bu çalışmada yüksek fps hızlarına sahip özel kameralar kullanılmıştır. Dört adet kameradan aynı anda

görüntüler alınarak paralel bir şekilde işlenmiştir. Görüntüden öz ilişki yöntemi kullanılarak öz nitelik çıkarılmıştır. Elde edilen öz nitelik sinyali üzerinde sinyal işleme yapılarak ray yüzey tespiti, makas tespiti, ray yüzeyi durum izleme ve arıza tespiti yapılmıştır.

Teşekkür

Bu çalışma TÜBİTAK tarafından desteklenmiştir. Proje No: 114E202.

5. Kaynaklar

1. Santur, Y., Karaköse, M., Aydın, İ., and Akin, E. (2016). IMU based adaptive blur removal approach using image processing for railway inspection. International Conference on In Systems, Signals and Image Processing (IWSSIP), 2016 (pp. 1-4).
2. Karakose, E., Gencoglu, M. T., Karakose, M., Yaman, O., Aydın, I., and Akin, E. (2015). A new arc detection method based on fuzzy logic using S-transform for pantograph–catenary systems. Journal of Intelligent Manufacturing, 1-18.
3. Santur, Y., Karaköse, M., and Akin, E. (2016). Learning Based Experimental Approach For Condition Monitoring Using Laser Cameras In Railway Tracks. Int. Journal of Applied Mathematics, Electronics and Computers, 4, 1-5.
4. Taştımur, C., Karaköse, M., and Akin, E. (2016). A Vision Based Condition Monitoring Approach for Rail Switch and Level Crossing using Hierarchical SVM in Railways. International Journal of Applied Mathematics, Electronics and Computers, 4(1), pp. 319-325.
5. Bao Q., Lu M., Lu R., (2007) A Research on the Container Car's Location Under the Bridge Crane By the Technology of Laser Measuring, Science & Technology Of Ports, 2007.
6. González-Nicieza, C., Álvarez-Fernández, M. I., Menéndez-Díaz, A., Álvarez-Vigil, A. E., Ariznavarreta-Fernández, F.(2008) Failure analysis of concrete sleepers in heavy haul railway tracks. Engineering Failure Analysis, 15(1), pp. 90-117.
7. Qingyong, L., Shengwei, R., (2012) A Real-Time Visual Inspection System for Discrete Surface Defects of Rail Heads, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 61, 2189-2199.
8. Limin, C., Yin, L., Kaimin, W., (2010) Inspection of rail surface defect based on machine vision system, 2nd International Conference on Information Science and Engineering, 3793 - 3796.
9. Ying, L., Trinh, T., Haas, N., Otto, C., Pankanti, S., (2014) Rail Component Detection, Optimization, and Assessment for Automatic Rail Track Inspection, Trans. on Intel. Trans. Sys., 760–770.
10. Yaman, O., Karakose, M., Aydın, I., and Akin, E. (2014). Detection of pantograph geometric model based on fuzzy logic and image processing. In Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), pp. 686-689
11. Karakose, E., and Gencoglu, M. T. (2013). An analysis approach for condition monitoring and fault diagnosis in pantograph-catenary system. IEEE International Conference on In Systems, Man, and Cybernetics (SMC), pp. 1963-1968.
12. Johansson, A., Pålsson, B., Ekh, M., Nielsen, J. C., Ander, M. K., Brouzoulis, J., and Kassa, E. (2011). Simulation of wheel–rail contact and damage in switches & crossings. Wear, 271(1), 472-481.
13. Bocciolone, M., Caprioli, A., Cigada, A., and Collina, A. (2007). A measurement system for quick rail inspection and effective track maintenance strategy. Mechanical Systems and Signal Processing, 21(3), 1242-1254.
14. Pålsson, B. (2014). Optimisation of railway switches and crossings. Chalmers Univ. of Tec.
15. Molodova, M., Li, Z., Núñez, A., and Dollevoet, R. (2013). Monitoring the railway infrastructure: Detection of surface defects using wavelets. In 16th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC) (pp. 1316-1321).
16. Dubey, A., and Jaffery, Z. (2016). Maximally Stable Extremal Region Marking (MSERM) based Railway Track Surface Defect Sensing. IEEE Sensors Journal.
17. Babenko, P. (2009). Visual inspection of railroad tracks, Doctoral dissertation, University of Central Florida Orlando, Florida.
18. Li, Z., Mahapatra, D., Tielbeek, J. A., Stoker, J., van Vliet, L. J., and Vos, F. M. (2016). Image registration based on autocorrelation of local structure. IEEE transactions on medical imaging, 35(1), pp. 63-75.

Sürtünme Kaynak Yöntemi ile Birleştirilmiş SCR 420/AISI 1040 Çelik Çiftlerinin Arayüzey Mikroyapı Özelliklerinin İncelenmesi

Furkan SARSILMAZ,¹ İhsan KIRIK², Mustafa AY¹

¹Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fak, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Elazığ, Türkiye

²Batman Üniversitesi Mühendislik Fak, Metalurji Malzeme Müh. Bölümü, Batman, Türkiye

fursar@gmail.com

(Geliş/Received: 07.02.2017; Kabul/Accepted: 28.04.2017)

Özet

Bu çalışmada, SCR 420 ve AISI 1040 çelik çifti, sabit sürtünme ve yığma süreleri altında üç farklı devir, sürtünme basıncı ve yığma basıncı kullanılarak sürekli tahrikli sürtünme kaynak yöntemiyle birleştirilmiştir. Kaynaklı birleştirmelerin, birleşme ara yüzeyinde, artan devir sayısı ve sürtünme basıncına bağlı olarak meydana gelen metalurjik değişiklikleri belirlemek için taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. Bununla birlikte birleşme ara yüzeyine dik doğrultuda alınan numunelerin mikrosertlik ölçümleri, kaynak sonrası ara yüzeyde oluşan mikroyapı ile ilişkilendirilerek değerlendirilmiştir. Mikroyapı ve mikrosertlik analizi sonuçlarından, düşük devir, yığma ve sürtünme basınçlarıyla yapılan kaynaklarda birleşme bölgesinde bağlantısız bölgelerin oluştuğu belirlenerek bu bölgelerin sertlik değerlerinin yüksek devir sayısı, yığma ve sürtünme basıncıyla yapılan kaynaklara nazaran daha düşük değerlerde olduğu görülmüştür. Buna karşın, artan devir sayısına bağlı olarak ITAB'nin genişleyerek ve aşırı deformasyona uğramış bölgede martenzit oluşumuyla beraber sertliğin arttığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Sürtünme kaynağı, Mikroyapı, SCR 420, AISI 1040 çelik.

Investigation of Interface Microstructure Properties of SCR 420/AISI 1040 Steel Couple Welded by Friction Welding Process

Abstract

In this study, SCR 420 /AISI 1040 steel couple was welded by a continuous drive friction welding machine under constant friction and forging time with three different of rotational speeds, forging pressure and friction pressures respectively. SEM microscopy was implemented to determine the metallurgical changes in the region of interface regarding the rotational speed, friction and forging pressure. In addition, microhardness distribution across the interface was evaluated considering the metallurgical changes. From microstructure examinations and microhardness results, the welds which realized under lower rotational speeds, forging pressure and friction pressures it was seen that there was no connected regions and some defects at microstructural interface and moreover microhardness values were obtained too lower when compared to the other parameters. However, concerning with increasing rotational speeds, heat affected zone (HAZ) was extended and also microhardness value was considerably increased in the excessively deformed region.

Keywords: Friction welding, Microstructure, SCR 420, AISI 1040 steel.

1.Giriş

Son yıllarda gelişmekte olan günümüz teknolojisi, yeni üretim ve imalat yöntemlerinin doğmasına neden olmaktadır. [1]. Bu yöntem ve metotlar sayesinde üretimi zor olan malzemeler, daha kısa sürede içerisinde minimum malzeme sarfıyatı ile ekonomik olarak üretilebilmektedirler. Kaynak teknolojisi de bu imalat yöntemlerinden biri olması bakımından

uzun yıllardan beri son teknolojik gelişmeleri yakından takip etmektedir. Son zamanlarda katı hal kaynak teknolojisinin gelişimi ile birlikte, ergitmeli kaynak yöntemiyle birleştirilmesi oldukça zor olan ergime sıcaklıkları birbirinden farklı yada benzer olan metaller, yeni gelişimlere paralel sorunsuzca kaynaklanabilmektedirler [1,2]. Katı hal kaynak yöntemlerinden biri de sürtünme kaynağı yöntemidir. İlk defa imalat sektöründe 1940 yılında kullanılmaya başlanan

bu kaynak yöntemi, elektriksel enerji yada diğer bir harici ısı enerjisi kaynağı olmadan çalışma parçalarının ara yüzeylerinde sadece mekanik dönme hareketinin sürtünme yoluyla oluşturduğu termal enerji dönüşümü sayesinde elde edilen ısıdan yararlanılarak yapılan bir katı hal kaynak tekniğidir[3-5]. Bu kaynak tekniğinde ilave metal ve koruyucu gaza gerek yoktur. Özellikle simetrik olarak dönebilen hacimli parçaların birleştirilmesinde kullanılan bir katı hal kaynak yöntemi olup avantajları; yüksek malzeme tasarrufu, düşük üretim zamanı ve farklı metalik malzemelerin kaynağının mümkün olmasıdır. Sürtünme kaynağının uygulanması temelde oldukça basit bir işlemdir. Eksenel olarak birbiriyle karşılıklı hizalanmış temas eden iki iş parçasından en az biri belirli bir devirde dönerken, dönmesi engellenmiş sabit diğer iş parçası, bunun üzerine hidrolik basınç yardımıyla bastırılır. Dönme esnasında sürtünme sonucu parçaların temas eden yüzeylerinde ısı açığa çıkar. Normal şartlar altında ara yüzey ergimez. Çünkü kaynak birleşme bölgesinde ortaya çıkan yüksek ısının derecesi, çoğunlukla kaynak çiftlerinin ergime sıcaklığının altındaki bir sıcaklıkta bulunur. Isı ile akıcılık kazanan metal, uygulanan basıncın etkisiyle dışarı doğru taşmaya başlar. Kaynak bölgesinde kaynak sıcaklığına ulaşan metal çiftlerinin dönme hareketi, aniden durdurularak zaman kaybetmeden eksenel basınç kuvveti (yığma basıncı) ile parçalar şişirilmektedir[5,6]. Bu sayede kaynak bölgesinde tüm yüzey boyunca homojen bir formda dövülmüş ve plastik deformasyona uğramış yüksek kalitede kaynak metali (kaynak dikişi) meydana gelir. Bu metot ile aynı cinsten metaller birbiri ile kaynak yapılabildiği gibi, farklı cinsten malzemelerin de kaynatılması mümkün olmaktadır [6,7]. Bu çalışmada sanayi ve endüstrinin çeşitli kollarında kimyasal ve fiziksel özellikleri birbirinden farklı iki çelik (SCR 420 /AA1040) çiftleri kullanılmıştır. SCR 420 mühendislik uygulamaları ve otomotiv endüstrisinde krom içeriği nedeniyle özellikle korozyona maruz alanlarda çok yaygın kullanılmaktadır.

Üretim sonrası ısıtım işlem ve temperleme ile mekanik özellikleri daha fazla iyileştirilebilmektedir ve maliyet bakımından kendinden daha düşük alaşımlarla kaynak kabiliyeti oldukça yüksek olmasına karşın,

ergitmeli kaynak esnasında krom karbür çökelmeleri, ara yüzeyde yüksek ısı girdisiyle sert ve kırılgan bileşiklerin oluşumu imalatın kalitesini olumsuz etkilemektedir. Bu olumsuz nedenlerden dolayı çalışmamızda, bu alaşım çiftleri katı hal kaynak yöntemi olan sürtünme kaynağı yöntemiyle birleştirilerek ara yüzeyde oluşan mikroyapısal değişimler göz önüne alınarak en ideal kaynak parametrelerinin belirlenmesi amaçlanmıştır.

2. Materyal ve Metot

Çalışmada sürtünme kaynağı işlemlerinde deney numunesi olarak kullanılmak üzere iki farklı çelik malzeme çifti kullanılmıştır. Ticari olarak temin edilen SCR 420 ve orta karbonlu AISI 1040 numuneler, sürtünme kaynağı öncesi 12 mm çapında ve 72 mm boyunda işlenerek kaynağa hazırlanmışlardır. Bu malzeme çiftlerine ait kimyasal özellikler Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Deney çalışmalarında kullanılan malzemelerin kimyasal içerikleri

Material	%C	%Si	%Mn	S≤%	%Cr	%Ni	%Fe
SCR 420	0.20	0.04	0.90	0.008	0.85	0.002	Kalan
AISI 1040	0.42	0.30	0.55	0.05	-	-	Kalan



Şekil 1. Kaynak çiftlerinin birleştirme düzeni

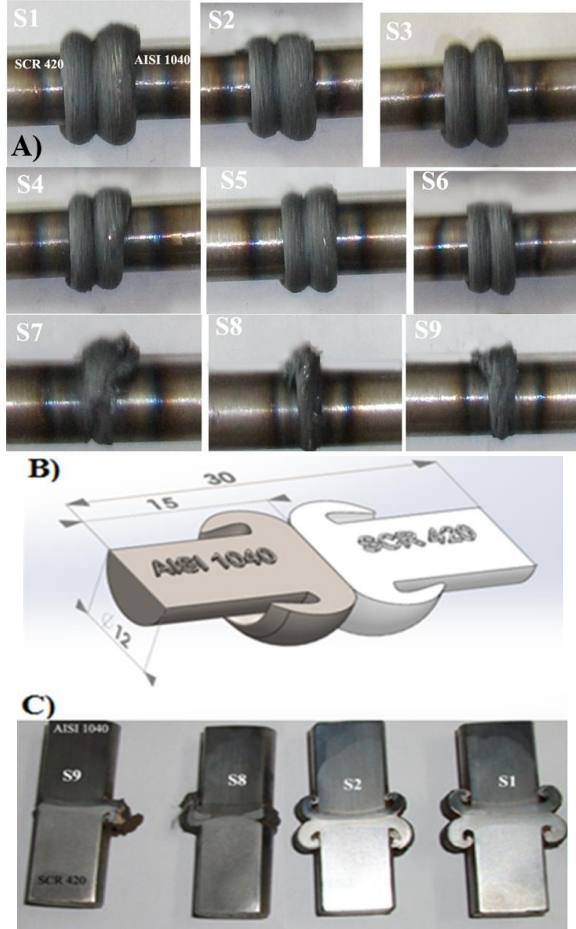
Numunelerin kaynak işlemleri, sürekli tahrikli sürtünme kaynak makinesinde Şekil 1. de gösterildiği düzende ve Tablo 2’de ki kaynak parametreleri göz önüne alınarak gerçekleştirilmiştir.

Kaynak sonrası, numunelerin birleşme bölgesinde meydana gelen yapısal değişimi belirlemek amacıyla; numuneler birleşme hattına dik doğrultuda kesilerek, yüzeyleri taşlanıp, 80-1200 zımpara ile temizlendikten sonra 3 µm’ lik elmas pasta ile parlatılmıştır. Numunelerde meydana gelen deformasyon sonucu dış yüzeyde oluşan kıvrımlı flash miktarları Şekil 2 görülmektedir. Parlatılan numuneler nitrik %2 asit+ %98 alkol çözeltisiyle dağlanmışır. Dağlanan numunelerin elektron mikroskopunda mikroyapı fotoğrafları alınmış ve EDS ile konsantrasyon profilleri belirlenmiştir.

Mikrosertlik ölçümleri, LEICA MHF-10 marka test cihazında HV sertlik skalası ile 1 mm aralıklarla 50 gr'lık yük altında 5sn bekleme süresinde gerçekleştirilmiştir.

Tablo 2. Kaynak parametreleri

Numune no	Devir sayısı (rpm)	Sürtünme basıncı (MPa)	Yığılma basıncı (MPa)	Sürtünme süresi (sn)	Yığılma süresi (sn)
S1	2500	60	100	5	2
S2	2300	60	100	5	2
S3	2100	60	100	5	2
S4	1900	50	80	5	2
S5	1700	50	80	5	2
S6	1500	50	80	5	2
S7	1300	40	60	5	2
S8	1100	40	60	5	2
S9	900	40	60	5	2

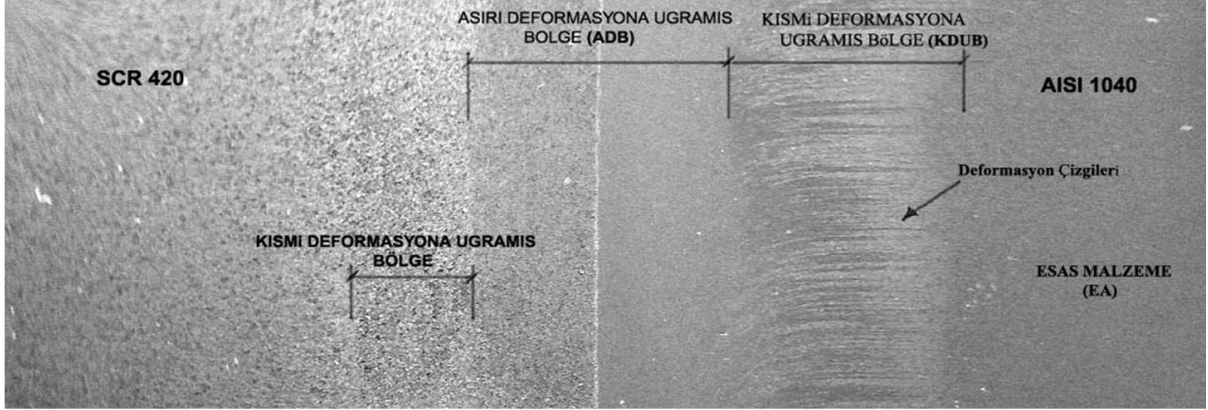


Şekil 2. a) Kaynak parametrelerine bağlı olarak ara bölgede oluşan kıvrım biçimindeki flash miktarları, b) Çıkarılan arakesitin numune boyutları, c) Birleştirilen numunelere ait kaynak ara kesit makro fotoğrafı.

3. Deneysel Sonuçlar ve Tartışma

2500 ve 900 dev/dak.'lık çevresel hızlarda birleştirilen S1-S9 numunelerin kaynak sonrası birleşme bölgesinden alınan makroyapı fotoğrafları Şekil 3'de verilmiştir. Resimlerden görüldüğü gibi birleşme ara yüzeyinde plastik deformasyonun etkisiyle oluşan kaynak flash miktarlarının her numune için birbirinden farklı olduğu gözlenmiştir. Ayrıca SCR 420 çiftinin AISI 1040 malzemeye göre yüksek sertlik kabiliyetinden dolayı kaynak sırasında oluşan kıvrım şekilli flash miktarlarının, AISI 1040 malzemeye göre daha az olduğu görülmüştür. Şekil 3'de S1 numunesinin kaynak ara bölgesindeki makroyapı fotoğrafı incelendiğinde herhangi bir çatlak, gözenek ve bağlantısız bölgeler görülmemektedir. Bununla birlikte ara kesitte, her iki malzemenin sürtünme esnasında oluşturdukları yaklaşık 10 µm genişliğindeki aşırı deformasyona uğramış bölge (ADB) ve bu bölgenin bitişiğinde yine basıncın etkisiyle dövülmüş, kısmi deformasyona uğramış bölge (KDUB) görülmektedir. Plastik deformasyonun etkisiyle dönme yönüne doğru oluşan deformasyon çizgileri ise net bir şekilde görülmektedir (Şekil3). Kaynak işlemi sırasında kaynak ara bölgesinde (Şekil 4) sıcaklıklar A_{c3} sıcaklığının üzerinde seyrettiğinden AISI 1040 tarafında çelik östenitten oluşan yapıya dönüşmektedir [1,7,8]. Bunun sonucunda kaynak işlemi sona erdiği esnada bu yapının yüksek sıcaklıklardan hızlı bir şekilde oda sıcaklığına soğumasıyla, Şekil 5 de görülen tane sınırından karbon difüzyonu ile kısmen deformasyona uğramış bölgede tane geometrisi değişerek iğneli tipte martenzitler meydana gelmiştir [9]. Deformasyona uğramamış bölgede ise baz malzemenin mikroyapı özelliği korunmuştur. AISI 1040 tarafındaki aşırı deformasyon sonucu oluşan deformasyon bantları bu malzemenin sertlik değerinin SCR 420 çeliğinden daha az olması ve plastik şekil değiştirme yeteneğinin yüksek olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

1300,1100,900 dev/dak.'lık çevresel hızlarda birleştirilen S7, S8, ve S9 numunelerinde kullanılan kaynak parametrelerine bağlı olarak, devir sayısının azalmasıyla birlikte kaynak bölgesinde ITAB'ın daraldığı görülmüştür.

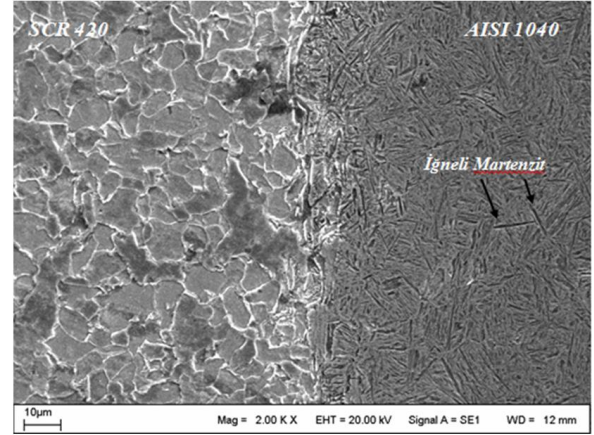


Şekil 3. S1 numunesinde kaynak sonrası ara-kesitte meydana gelen bölgeler

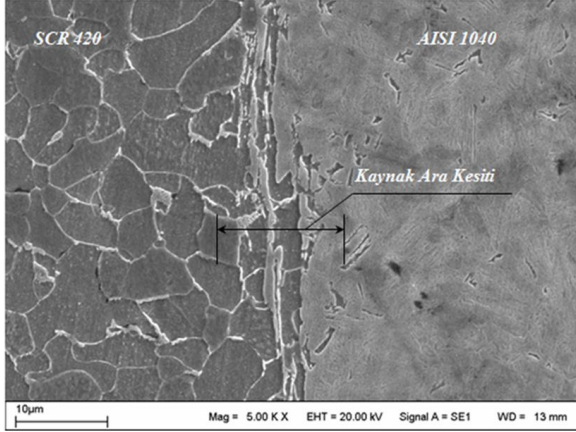
Buna yığma basıncı ve sürtünme basıncının kademeli olarak azalmasının da eşlik ettiği belirlenmiştir. Bu nedenle bağlantısız bölgelerin ve boşlukların diğer parametrelere kıyasla yoğun olduğu görülmüştür.

Bütün numunelerde artan yığma ve sürtünme basıncının etkisiyle viskoz hale gelmiş malzemenin daha fazla dışarıya atılmasına bağlı olarak aşırı deformasyona uğramış bölgenin daha daraldığı gözlenmiştir. Kaynak sonrası yüksek yığma ve sürtünme basıncının numune boyutunda boyca kısalmaya neden olduğu belirlenmiştir.

oluşması ve ayrıca yığma basıncının artmasıyla da viskoz haldeki bu plastik deformasyona uğrayan bölgenin, bağlantı ara yüzeyinden basınç etkisi ile uzaklaştığı düşünülmektedir.



Şekil 5. S2 numunesinde kısmen deforme olan bölgede (KDUB) oluşan martenzitik yapı

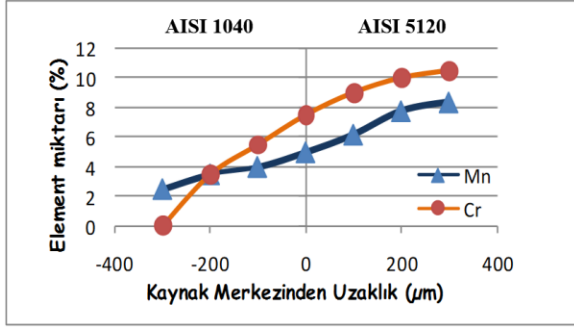


Şekil 4. S1 numunesi kaynak ara-geçiş bölgesi

Kaynaklı bağlantıların birleşme arakesitinin 100 µm eşit aralıklarla farklı noktalarından alınan EDS analizlerinde (Şekil 4 ve 5) AISI 1040 tarafına doğru Cr ve Mn element miktarlarında hissedilir bir difüzyon tespit edilmiştir. Düşük devir ve düşük sürtünme basıncı parametrelerinde yapılan kaynaklı birleştirmelere ise difüzyonun oluşumu için gereken sürenin kısıtlı olması nedeniyle difüzyonun çok dar bir bölgede

Şekil 6'da difüzyonun en yüksek meydana geldiği (2500 dev/dak) S1 numunesine ait konsantrasyon profilleri grafiğine göre, AISI 1040 tarafında 200 µm luk bir uzaklık içinde % element taşınım miktarının oldukça yükseldiği görülmüştür.

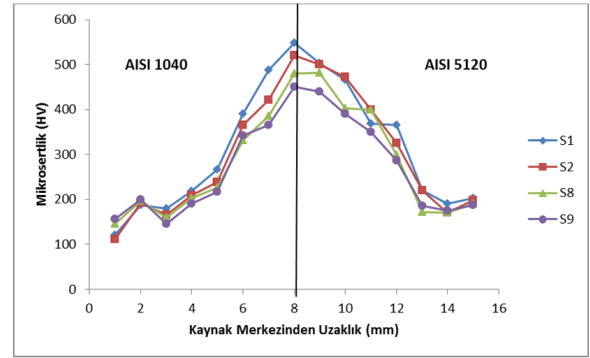
Mikro sertlik incelemeleri için en yüksek (S1,S2) ve en düşük (S8,S9) devir sayıları, yığma ve sürtünme basıncı altında yapılan kaynaklı bağlantıların ara kesiti üzerinden alınan mikrosertlik ölçüm sonuçlarıyla ilişkilendirilen eğriler Şekil 7'de verilmiştir.



Şekil 6. S1 numunesinden alınan EDS analiz konsantrasyon profilleri

Sonuçlar incelendiğinde bütün kaynaklı bağlantıların birleşme bölgesinde esas malzeme çiftlerine kıyasla oldukça yüksek sertlik değerlerinin elde edildiği görülmüştür. En yüksek sertlik, 2500 dev/dak da 100 MPa yığma ve 60 MPa sürtünme basıncı kullanılarak birleştirilen S1 kaynaklı bağlantıda 548 HV olarak kaydedilmiştir. Bu değişim, devir sayısının artmasıyla ADB'de ulaşılan sıcaklık derecesini artıracak ve sürtünme basıncının şiddetli deformasyon etkisi yaparak deformasyon sertleşmesine ve tanelerde küçülmeye yol açacağı düşünülmektedir [10,11]. Aşırı deformasyona uğrayan bölgede (ADB) sertlik değerleri maksimuma ulaşmasına karşın, tane yönelmeleriyle deformasyon çizgilerinin olduğu bölge ve kısmen deforme olan bölgede mikrosertlik değerlerinde kademeli bir düşüş söz konusudur. Ayrıca diğer parametrelerde gerçekleştirilen kaynakların, sertlik dağılım profillerinin de birbirlerine yakın eğriler halinde olduğu görülmektedir. SCR 420 ve AISI 1040 tarafında kısmen deformasyona uğrayan (KDUB) bölgedeki sertlik profilleri, kendi aralarında kıyaslandığında önemli bir farklılık görülmemektedir. Ancak her iki tarafın aşırı deformasyona uğradığı bölgedeki sertlik değerlerinden baz malzemeye kadar olan sertlik dönüşümleri incelendiğinde, SCR 420 tarafında sertlik dağılımlarının KDUB bölge içinde AISI 1040 tarafına kıyasla daha geniş bir mesafede daha düzenli sertlik düşüşü gösterirken bu durum AISI 1040 tarafında ise daha kısa mesafede baz değer olan 100-200 HV arası değerlere ulaştığı görülmüştür. Bu durum KDUB bölge içinde SCR 420 nin AISI 1040 a göre daha yüksek sertlik değerleri sergilediği anlamına gelmektedir. Kai Gao ve arkadaşlarının [9] çalışmasına göre SCR 420 tarafının sertlik değerinin 1040 a göre daha düzenli olmasının nedeninin alaşım

elemanlarından kromun, karbon difüzyonunu yavaşlattığı ve östenit-perlit dönüşümünü geciktirmesinin etkili olduğunu vurgulamışlardır. Ayrıca, önceden yapmış olduğumuz çalışmalarda [3,12] demirli malzemelerin sürtünme kaynaklarında arayüzeyde ulaşılan sıcaklık derecesinin A3 sıcaklığın üzerinde olduğu belirtilmiştir. artan devir sayısına bağlı olarak arayüzeyde ulaşılan sıcaklık derecesinin çok yükselerek bu sıcaklık değerlerinden östenit-perlit dönüşümüne imkan verilmeden oda sıcaklığına ulaşılması AISI 1040 tarafında iğneli martenzit biçiminde (Şekil 5) dönüşüm, SCR 420 tarafında ise dövme sertleşmesi ve kısmen de olsa krom karbür çökmesi meydana getirerek ara bölgede kırılğan ve sert intermetalik faz tabakalarının oluşmasına neden olarak sertlik değerlerinin yükselmesine neden olduğu düşünülmektedir [13].



Şekil 7. S1,S2,S8 ve S9 numunelerinden alınan mikro sertlik eğrileri

4. Genel Sonuçlar

AISI 1040/ SCR 420 çiftlerinin sürtünme kaynağı ile yapılan birleştirmelerinde, birleşme ara yüzeyinde herhangi bir çatlak, ve bağlantısız bölgeler görünmemekle birlikte her iki malzemenin karışımından oluşan yaklaşık 10-20 µm genişliğindeki aşırı deformasyon uğramış bölge ve bu bölgenin bitişiğinde yine basıncın etkisiyle dövülmüş, ve plastik deforme olmuş bir bölge ve onun bitişiğinde kısmen deforme olan ve yönelmiş tanelerden oluşan deformasyon çizgileri ve akış yönüne doğru yönelmeler açıkça görülmektedir. Kaynak parametrelerine bağlı olarak sürtünme basıncı ve yığma basıncının artmasıyla aşırı deforme olan bölgenin daraldığı ve flash miktarlarının arttığı tespit edilirken devir sayısının yüksek seçilmesiyle ITAB ın genişlediği belirlenmiştir. Ayrıca yüksek devir, artan

sürtünme basıncı ve artan kaynak sürelerinin etkisiyle, element difüzyonunun arttığı, kaynak ara bölgesinde ise sertlik değerleri, oluşması muhtemel intermetallik ve martenzit yapı nedeniyle ile en yüksek değerlere ulaşmıştır. Genel sonuçlar aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır;

a. Bu çalışmada, benzer olmayan AISI1040 çeliği ile SCR 420 çelik çifti üç farklı devir sayısı, yığma ve sürtünme basınçları altında başarılı bir şekilde birleştirilmiş olup birleşme ara yüzeyinde kalıntı, boşluk ve bağlantısız bölgelerin olmadığı görülmüştür.

b. Kaynaklı bağlantıların ara birleşme mikroyapı fotoğraflarının tamamında, literatüre uygun üç farklı bölgenin oluştuğu belirlenmiştir. Bunlar; aşırı deformasyona uğramış bölge (ADB), kısmen deformasyona uğramış bölge (KDUB) ve esas metal (EM) dir. En çok yapısal dönüşüm kaynak birleşme çizgisine yakın ADB bölgelerinde görülmüştür. Artan devir sayısına bağlı olarak yapısal dönüşüme uğrayan bölgelerin genişliğinde artış gözlenmiştir.

c. Mikrosertlik deneyi sonuçlarına göre, en yüksek sertlik artışı S1 no' lu numunede 548 HV ve en düşük sertlik değeri ise S9 no' lu numunede 459 HV olarak elde edilmiştir. Mikrosertlik verilerinin artan devir sayısı, yığma ve sürtünme basınçları parametrelerine paralel olarak birleşme bölgesinde en yüksek değerlere ulaştığı belirlenmiştir. Ayrıca AISI 1040 tarafında hızlı soğuma nedeniyle martenzitik dönüşümün meydana gelmesi ve SCR420 tarafında ise Cr varlığının ostenit-perlit dönüşümünü geciktirmesiyle sertlik düşüşlerinin bu bölgede AISI 1040 tarafına kıyasla daha geniş bir aralıkta düzenli bir düşüşe neden olduğu görülmüştür.

5. Kaynaklar

- Özdemir, N. (2002). Tane küçültülmüş düşük alaşımli yüksek karbonlu çeliklerin sürtünme kaynağı ile birleştirilebilirliğinin araştırılması. Doktora Tezi. F. Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, Türkiye.
- Kahraman, N., Yılbaş, B. ve Odabaş, D. (1995). H2210 Çeliği İle Alüminyumun Sürtünme Kaynağıyla Kaynak İşlemi ve Kaynak Parametrelerinin Kaynak Üzerine Etkilerinin Deneysel olarak Araştırılması. 6. Uluslararası Malzeme Sempozyumu, 217-220, Denizli.
- Özdemir, N., Sarsılmaz, F. ve Haşçalık, A. (2007). Effect of rotational speed on the interface properties of friction-welded AISI 304L to 4340 steel. *Materials&Design*, **28**: 301-307.
- Ozan, S. ve Çay, V.V. (2004). Sürtünme Kaynak yöntemi İle Birleştirilmiş AISI 420/AISI 1010 Çelik Çiftinin Arayüzey Mikroyapı Özelliklerinin İncelenmesi, *Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları Dergisi*, **2**: 180-184.
- Lucas, W.(1971). Process Parameters and Friction Welds, *Met. Cons. and British Welding J.*, **71**: 293-297.
- Çalgülü, U., Orhan, A. ve Gür, A.K. (2007). Sürtünme Kaynak Yöntemiyle Birleştirilmiş AISI 420/AISI 1010 Çelik Çiftinde Çevresel Hızın Mikroyapı Özelliklerine Etkisi. *Fırat Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, **19**: 583-592.
- Kaluç, E.(2004). Kaynak teknolojisi el kitabı, *MMO Yayınları*, 356-358, Ankara.
- Şahin, M. (2010). Friction Welding of Different Materials. *10th Anniversary International Scientific Conference (UNITECH'10)*, 131-134, Gabrovo, Bulgaria.
- Gao, K., Qin, X., Wang, Z. ve Zhu, S. (2016). Effect of spot continual induction hardening on the microstructure of steels: Comparison between AISI 1045 and 5140 steels. *Materials Science and Engineering: A*, **651**: 535-547.
- Şahin, M., Akata, H.E. ve Erdoğan, S. (2002). Plastik Şekil Değiştirmiş Çeliklerin Sürtünme Kaynağıyla Birleştirilmesi Üzerine Bir Çalışma. 9. Uluslararası Malzeme Sempozyumu, **9**:390-396, Denizli.
- Ozdemir, N. (2005). Investigation of the mechanical properties of friction-welded joints between AISI 304L and AISI 4340 steel as a function rotational speed. *Materials Letters*, **59**: 2504-2509.
- Kırık, I., Ozdemir, N. ve Sarsılmaz, F. (2012). Microstructure and Mechanical Behaviour of Friction Welded AISI 2205/AISI 1040 Steel Joints. *Materials Testing*, **54**: 683-687.
- Kurt, A., Uygur, I. ve Paylaşan, Ü. (2011). Effect of Friction Welding Parameters on Mechanical and Microstructural Properties of Dissimilar AISI1010-ASTM B22 Joints. *Welding Journal*, **90**: 102-106.

Nicel Birliktelik Kuralları İçin Çoklu Minimum Destek Değeri

Yalçın ATEŞ, Murat KARABATAK

Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Yazılım Müh. Bölümü
y_ates@hotmail.com, mkarabatak@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 14.11.2016; Kabul/Accepted: 31.07.2017)

Özet: Veri Madenciliği, sayısal ortamlarda biriken verilerden anlamlı ve faydalı bilgiler elde etmek için son yıllarda yoğun olarak kullanılan bir çalışma alanıdır. Birliktelik Kuralı ise veriler arasındaki ilişkileri ortaya çıkarmak için kullanılan Veri Madenciliği tekniklerinden biridir. Birliktelik kuralı problemi, ilk olarak 1993 yılında Agrawal ve arkadaşları tarafından ele alınmıştır. Birliktelik kuralı uygulamalarında kullanılan destek ve güven değerleri bu yöntemin en önemli iki parametresidir. Ancak nicel değerlere sahip veri setlerinde destek değerinin belirlenmesi sorun oluşturabilmektedir. Minimum destek değerinin uygun seçilememesi, veri setindeki ilginç ve değerli bazı kuralların ya üretilmemesine ya da değerli olmayan çok sayıda gereksiz kural üretilmesine neden olmaktadır. Bu çalışmada, nicel veri setleri üzerinde destek değerinin seçilmesi sorununu giderebilmek için çoklu destek değeri kullanan yeni bir yaklaşım önerilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Birliktelik Kuralı, Minimum Destek, Çoklu Minimum Destek.

Multiple Minimum Support Value For Quantitative Association Rules

Abstract: Data Mining is a field that has been used extensively in recent years to obtain meaningful and useful information from data accumulated in digital environments. Association Rule is one of the Data Mining techniques that are used to reveal relationships between data. The association rule problem was offered in 1993 by Agrawal et al. The support and confidence values used in association rules are the two most important parameters of this method. However, determining the value of support in quantitative data sets can be problematic. Failure to select the minimum support value causes some interesting and valuable rules in the dataset to either not be produced or to generate a large number of unnecessary rules that are not valuable. In this study, a new approach that uses multiple support values to overcome the problem of selecting support values on quantitative data sets is offered.

Keywords: Association Rule, Minimum Support, Multiple Minimum Support

1. Giriş

Francis Bacon tarafından 1597’de söylenen "Scientia potentia est - Bilgi güçtür" sözü, teknoloji ile beraber günümüzde önemini oldukça arttırmıştır. Bilgi ve iletişim çağının hızla geliştiği dünyada, teknoloji hayatın her alanında kullanılmaya başlanmıştır. Bu kullanımlar sonucunda oluşan veriler çok büyük veri yığınlarına sebep olmaktadır. Veri tabanı sistemlerinin günümüzde yaygın olarak kullanılması, elde edilen verilerin olağanüstü şekilde artmasını sağlamıştır. Bu durum, insanları bu verilerden maksimum sonuçlar çıkarmak için yeni yollar keşfetmeye yöneltmiştir. Bu nedenle Veri Tabanlarında Bilgi Keşfi adı altında her geçen gün yeni arayışlar ortaya çıkmaktadır. VTBK sürecinin en önemli aşamasını, modelin

kurulması ve değerlendirilmesi süreçlerini de içeren veri madenciliği oluşturmaktadır [1].

Veri Madenciliği ile bir marketin veri analizini yapılarak her ürün için bir sonraki ayın satış öngörülerini çıkarılabilmekte, müşteriler satın aldıkları ürünlere bağlı olarak gruplanabilmekte, yeni bir ürün için potansiyel müşteriler belirlenebilmekte ve müşterilerin zaman içindeki hareketleri incelenerek onların davranışları ile ilgili öngörüler yapılabilmektedir. Bu bilgilere bağlı olarak da yeni kampanya ve satış stratejileri belirlenmektedir. Binlerce ürünün ve müşterinin olabileceği düşünüldüğünde bu analizin gözle ve elle yapılamayacağı, otomatik olarak yapılmasının gerektiği ortaya çıkmaktadır. Bu aşamada veri madenciliği yöntemleri devreye girmektedir. Kısaca veri madenciliği; büyük ölçekli veriler arasından ‘değeri olan’ bilgileri

elde etme işi olarak tanımlanmaktadır [2]. Bu sayede, veriler arasındaki ilişkilerin ortaya çıkarılması ve gerektiği zamanda da ileriye yönelik öngörülerde bulunulması mümkün olabilmektedir.

Veri madenciliğinde bilgilerin verimli kullanılabilmesi için birçok teknik kullanılmaktadır. Bu tekniklerden biri de birliktelik kuralıdır. Birliktelik kuralı; veri tabanı içinde yer alan kayıtların birbiriyle olan ilişkilerini inceleyerek, hangi olayların eş zamanlı olarak birlikte gerçekleşebileceklerini ortaya koymaya çalışan veri madenciliği yöntemlerinden biridir. Birliktelik kuralı, nesnelerin veya niteliklerin bir arada olma durumlarını belirlemekte ve birçok alanda kullanılabilmektedir. Birliktelik kuralı bulma işlemi, yoğun nesne kümesi hesaplamaya dayalı bir işlem olup büyük veri tabanları üzerinde uygulanması oldukça pahalı bir işlemdir. Bu nedenle daha önceden tespit edilen birliktelik kurallarının korunması da oldukça önemli bir konu olmaktadır.

Genellikle büyük süpermarketlerde oluşan satış verilerine, market sepet verisi adı verilmektedir. Birçok kuruluş market sepet verilerinin önemini kullanarak bu verilerden büyük faydalar sağlamayı amaçlamaktadır. Market sepet verisi üzerinde birliktelik kuralı problemi ilk olarak 1993 yılında ele alınmıştır [3]. Sepet analizinde amaç, nitelikler (ürün satışları) arasındaki ilişkiyi bulmaktır. Bu ilişkilerin bilinmesi, bir şirketin gelecekte elde edebileceği kârını arttırmak için kullanılabilecektir. Sepet analizi günlük işlemler sonucu elde edilen verilerden anlamlı bağıntılar çıkarmada kullanılır.

Birliktelik kuralı, birçok araştırmada ele alınmış ve birliktelik kuralı üreten algoritmalar geliştirilmiştir. Agrawal ve Srikant'ın 1994 yılında yaptıkları çalışmada önerdikleri Apriori algoritması bu algoritmalar arasında en fazla bilinen ve en yaygın kullanıma sahip algoritmalarından biridir [4]. Yine aynı çalışmada, Apriori_TID isimli bir başka birliktelik kuralı algoritması da önerilmiştir. Önerilen Apriori_Hybrid algoritması, Apriori ve Apriori_TID algoritmalarının her ikisini beraber kullanan melez bir algoritmadır. Ayrıca Manila ve arkadaşları 1994'te çevrimdışı aday nesne kümesi

belirleme algoritmasını, Houtsma ve Swami 1995'te SETM algoritmasını, Savasere ve arkadaşları 1995'te Partition algoritmasını, Holsheimer ve arkadaşları ise 1995'te MONET algoritmasını önermiş ve bu gibi birçok birçok algoritma literatürde yerini almıştır [5-8].

Birliktelik kuralı üreten algoritmalar sadece ürün birlikteliklerini dikkate almayıp, ürünlere ait; miktar, ağırlık ve hiyerarşik bilgi düzeni gibi özellikleri de göz önüne almaktadır. Bu kapsamda hiyerarşik birliktelik kuralı [9], sınırlandırılmış birliktelik kuralı [10], nicel birliktelik kuralı [11], sıralı örüntü keşfi [12], ağırlıklandırılmış birliktelik kuralı [13] ve negatif birliktelik kuralı [7] gibi algoritmalar geliştirilmiştir.

Birliktelik kuralı üretilcek veri setine ait niteliklerin, nicel değerlerden oluşması birliktelik kuralı algoritmaları için problem oluşturmaktadır. Bu problemleri çözmek için literatürde çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Chen ve arkadaşları tarafından 2016 yılında yapılan çalışmada, nitelikler için geçici bulanıklaştırma yöntemi uygulanarak nicel veriler üzerinde birliktelik kuralı uygulaması gerçekleştirilmiştir [14]. Bir diğer çalışmada Gosain ve Maneela, gerçekte birçok verinin nicel değerlerden oluştuğunu dile getirmiş ve birliktelik kuralı probleminin nicel veriler üzerinde çalışmasına yönelik farklı algoritmalar önermiştir [15]. Ouyang ise 2012'de yaptığı çalışmada geleneksel birliktelik kuralında karşılaşılan problemlere değinmiş ve bu problemin çözümüne yönelik bulanık çoklu destek değer kullanan yeni bir algoritma önermiştir [16]. Yine Lee ve arkadaşları tarafından yapılan bir diğer çalışmada, çoklu minimum destek değeri uygulayan bir çalışma yapılarak bu probleme bir çözüm önerisi sunulmuştur. Ancak, yaptıkları bu çalışmada çoklu destek değerini ürünler bazında gerçekleştirmişlerdir [17].

Bu çalışmada da, birliktelik kurallarındaki minimum destek değerinin nicel veriler üzerinde oluşturmuş olduğu sorunlar irdelenmiş ve bu sorunların giderilmesine yönelik bir çözüm önerisi sunulmuştur. Elde edilen birliktelik kurallarının değerli ve ilginç olması çok önemli bir beklentidir. Çok sayıda kural üretilmesinden e bu kuralların ne derece ilginç olduğu önemli bir parametre olup bu ilginçlik "lift" değeri ile

ölçülmektedir [18]. Bu çalışmada yine çoklu minimum destek değerlerini nitelikler bazında kullanarak, nicel birliktelik kurallarında ilginç ve değerli kuralların belirlenmesi hedeflenmektedir.

2. Veri Madenciliği

Günümüzde bilgiye ulaşmak kadar var olan koşullar dâhilinde elde edilen verilerden yeni ve faydalı bilgiler üretmek de önemli bir konu haline gelmiştir. Devasa şekilde büyüyen sayısal veriler arasından yararlı ve de gerekli bilgilerin çıkarılması çabaları hızla sürmektedir. Bu aşamada, veri madenciliği kavramı göze çarpan en önemli olgulardan biridir. Frawley veri madenciliğini *“Daha önceden bilinmeyen ve potansiyel olarak yararlı olma durumuna sahip verinin keşfedilmesi”* olarak tanımlamıştır. Berry ve Linoff, 1997 yılında bu kavrama *“Anlamlı kuralların ve örüntülerin bulunması için geniş veri yığınları üzerine yapılan keşif ve analiz işlemleri”* şeklinde bir açıklama getirirken Sever ve Oğuz çalışmalarında veri madenciliği hakkında *“Önceden bilinmeyen, veri içinde gizli, anlamlı ve yararlı örüntülerin büyük ölçekli veritabanlarından otomatik biçimde elde edilmesini sağlayan veri tabanlarında bilgi keşfi süreci içerisinde bir adımdır.”* tanımını kullanmışlardır [19, 20]. Kısaca veri madenciliği; geniş veri tabanlarındaki veriler arasından bilgi çıkarma işlemi olarak tanımlanmaktadır.

2.1. Veri madenciliği modelleri

Veri madenciliği modelleri, temel olarak iki başlık altında incelenmektedir. Bunlardan birincisi, elde edilen örüntülerden sonuçları bilinmeyen verilerin öngörüsü için kullanılan model, diğeri ise elde edilen verinin tanımlanmasını sağlayan tanımlayıcı modeldir [1].

Öngörü yapan modellerde, sonuçları bilinen veriler kullanılarak bir model geliştirilir. Oluşturulan bu model kullanılarak sonuçları bilinmeyen veri kümeleri için sonuç değerleri ile ilgili öngörü yapılması amaçlanmaktadır. Örneğin bir banka, daha önceki dönemlerde müşterilerine verdiği tüm kredilerle ilgili bilgilere sahiptir. Bu bilgileri kullanarak daha sonraki dönemlerde müşterilere vereceği kredinin geri dönüp

dönmeyeceğini müşteri bilgilerini kullanarak öngöründe bulunabilir.

Tanımlayıcı modeller ise karar vermeye rehberlik etmede kullanılabilecek mevcut verilerdeki örüntülerin tanımlanmasını sağlamaktadır. Belirli özelliklere sahip insanların bazı davranışlarının birbirine benzerlik göstermesi tanımlayıcı modele bir örnek olabilir.

Veri madenciliği modellerini gördükleri işlemlere göre ise üç ana başlık altında incelemek mümkündür [2]. Bunlar;

- Sınıflama ve Regresyon,
- Kümeleme,
- Birliktelik kuralları ve ardışık zamanlı örüntülerdir.

2.2. Birliktelik kuralı

Günümüzde, birçok alandaki veriler bulut sistemleri gibi verinin yoğun olduğu teknolojilerde, sunucu bilgisayarlarda veya kişisel bilgisayarlarda, veri tabanları üzerinde saklanmaktadır. Bu verilerden, istenilen ve kayda değer bilgilere ulaşmak için kullanılan tekniklerden biri de birliktelik kurallarıdır. Birliktelik kuralı, birçok alanda yaygın kullanım alanına sahiptir ve nesnelerin veya niteliklerin bir arada olma durumlarını belirlemede kullanılmaktadır. Birliktelik kuralı bulma işlemi, yoğun nesne kümesi hesaplamaya dayalı bir işlem olup büyük veri tabanları üzerinde uygulanması oldukça pahalı bir işlemdir. Bu nedenle daha önceden tespit edilen birliktelik kurallarının korunması da oldukça önemli bir konu olmaktadır [1].

Son zamanlarda, otomatik tanıma ve veri toplama uygulamalarındaki gelişmeler sayesinde firmaların satış noktalarında barkod sistemleri kullanımı yaygınlaşmaya başlamıştır. Bu gelişmeler ile beraber bir markete ait satış verilerinin elektronik ortamlara aktarılmasına olanak sağlanmıştır. Genellikle büyük süpermarketlerde oluşan bu tür verilere market sepet verisi adı verilmektedir. Birçok kuruluş, market sepet verilerini kullanarak bu verilerden büyük faydalar sağlamayı amaçlamaktadır.

Market sepet verisi üzerinde birliktelik kuralı problemi, ilk olarak 1993 yılında ele alınmıştır.

[3]. Sepet analizinde amaç, nitelikler (ürün satışları) arasındaki ilişkiyi bulmaktır. Bu ilişkilerin bilinmesi şirketin kârını arttırmak için kullanılabilir. Eğer A ürün veya ürün grubunu alan müşterilerin B ürün veya ürün grubunu da çok yüksek bir olasılıkla aldıkları biliniyorsa o müşterilerin potansiyel bir B müşterisi olduğu öngörülebilir. Sepet analizi günlük işlemler sonucu elde edilen verilerden anlamlı bağıntılar çıkarmada kullanılır. “Eğer A ürününü alıyorsa %x ihtimalle B ürününü de almaya da yatkındırlar.” şeklinde bir sonuç A ürününü satan bir mağaza için çok faydalı bir bilgi olabilmektedir. Sepet analizi uygulamaları; çapraz satış (cross-selling), mağaza raflarının düzenlenmesi (layout), katalog tasarımı ve fiyatlandırma (pricing) gibi alanlarda kullanılmaktadır.

Birliktelik kuralı sorgusunun matematiksel modeli Agrawal ve ark. tarafından tanımlanmıştır. Bu modelde $I = \{i_1, i_2, \dots, i_m\}$ ürün kodlarını; D , tüm hareketleri; T , bir hareketteki ürün kodlarını; ($T \subseteq I$), t her harekete ait birincil anahtarı, k -nesne kümesi, k adet ürünü içeren kümeyi temsil etmektedir. X bir ürün kümesi olmak üzere; T hareketi X ürün kümesini ancak ve ancak $X \subseteq T$

şartını sağladığı zaman içermektedir. X ve Y , I ürün kümesinin bir alt kümesi ve $X \cap Y = \emptyset$ olduğu zaman, bir birliktelik kuralı $X \rightarrow Y$ biçimindeki bir bağımlılık ifadesi ile gösterilmektedir. Bu ifade ile X , Y 'yi belirler veya Y , X 'e bağımlıdır denir. Hareket numaraları gruplandırılarak elde edilen ürünler arasındaki bağımlılık ilişkisinin yüzde yüz doğru olması beklenemez. Benzer şekilde, çıkarsama yapılan kuralın elde edilen hareketler kümesinin önemli bir kısmı tarafından desteklenmesi istenir. Bu nedenlerden dolayı, $X \rightarrow Y$ eşleştirme kuralı kullanıcı tarafından minimum değeri belirlenmiş güven (c :confidence) ve destek (s :support) eşik değerlerini sağlayacak biçimde üretilir. $X \rightarrow Y$ eşleştirme kuralına, c güven ölçütü ve s destek ölçütü eklenir ve $\Phi(D) = \langle X \rightarrow Y, c, s \rangle$ ile gösterilir. Burada D , örnekleme; $X \rightarrow Y$ ifadesi birliktelik kuralını; c eşik değeri, ilgili kuralın minimum güvenirliliğini; s eşik değeri ise ilgili kuralın minimum destek değerini göstermektedir. Sepet analizinde ürünler arasındaki bağıntı, destek ve güven kriterleri ile hesaplanmaktadır. Destek ve güven kriterlerinin tanımları aşağıdaki gibi yapılmaktadır.

$$\text{Destek} : P(X \rightarrow Y) = \frac{X \text{ ve } Y \text{ nin birlikte satın alındığı durum sayısı}}{\text{Toplam müşteri sayısı}}$$

$$\text{Güven} : P(X/Y) = \frac{P(X \wedge Y) \{X \text{ ve } Y \text{ satın alanların sayısı}\}}{P(Y) \{Y \text{ satın alanların Sayısı}\}}$$

Destek kriteri, veri içerisinde bulunan nesneler arasındaki bağıntının ne kadar sık olduğunu, güven kriteri ise Y ürününü almış olan bir kişinin hangi olasılıkla X ürününü alacağını göstermektedir. İki ürün arasında elde edilen bağıntının önemli olabilmesi için hem destek değerinin, hem de güven kriterinin olabildiğince

yüksek olması gerekmektedir. Ancak bu iki değer de yüksek olması her zaman önemi yüksek ve ilginç kuralların elde edileceği anlamı taşımamaktadır. Bu nedenle, bir kuralın ne derece ilginç olduğunun tespitine yönelik olarak *lift* değeri kullanılmaktadır [18]. Lift değeri;

$$\text{Lift}(X \rightarrow Y) = \frac{\text{destek}(X \wedge Y)}{\text{destek}(X) \cdot \text{destek}(Y)} = \frac{P(Y|X)}{P(Y)}$$

denklemleri ile hesaplanmaktadır. Lift ölçütünün “1” değer alması ilginçliğin olmadığını 1’den büyük veya küçük değerler alması ise ilginçliğin arttığını göstermektedir.

2.3. Nicel birliktelik kuralları

Orijinal birliktelik kuralı problemi, niteliklerin var/yok (boolean) değeri ile

ilgilenmektedir. Ancak niteliklerin aldığı değerler birçok problemde ikiden fazla olabilmektedir. Bu durumlarda, niteliklerin sayısal veya kategorik değerleri ile kural üretmek için Srikant ve Agrawal tarafından 1996'da etkili bir algoritma önerilmektedir [11]. Örneğin, Yaş:30..39 ve Evli: Evet → Arabaların Sayısı: 2 (%40, 90%) şeklinde verilen bir kural nicel birliktelik kuralı olarak değerlendirilmektedir. Bu kural, yaşı 30 ile 39 arasında olan ve evli olan insanların %90'nın iki araba sahibi olduğu anlamına gelmekte ve veri tabanı üzerindeki destek değeri %40'tır. Tablo 1'de Nitel değerlere sahip bir veri seti görülmektedir.

Tablo 1. Nicel/nitel değerler içeren örnek veri seti

ID	Cinsiyet	Gelir	Yaş
1	Bayan	Düşük	yaş <18
2	Erkek	Orta	18<yaş<25
3	Erkek	Orta	25<yaş<35
4	Erkek	Düşük	Yaş>35
5	Erkek	Yüksek	Yaş>35

3. Yöntem

3.1. Problemin tanımı

Birliktelik kuralı, minimum destek değerini parametre olarak kullanmakta ve veri setini tarayarak bu değeri sağlamayan nitelikleri her adımda elemektedir. Veri setine ait tüm niteliklerin aldığı değerler eşit aralıkta olduğunda sabit bir minimum destek değeri kullanılması sorun teşkil etmemektedir. Ancak nicel veya nitel değerler alan ve niteliklerin aldığı değerlerin farklılıklar oluşturduğu veri setlerinde sabit minimum destek değeri uygun sonuçlar üretmemektedir. Veri setlerindeki farklı niteliklerin aynı öneme, sıklığa veya yapıya sahip olmamaları veya bazı niteliklerin sık olmasa da daha büyük öneme sahip olmaları çeşitli sorunlar ortaya çıkarabilmektedir [17].

- Minimum destek değeri yüksek olduğunda, bazı ilginç ve değerli kurallar sık tekrarlanmadığı için elde edilememekte,

- Minimum destek değeri düşük olduğunda ise elde hem kural sayısı aşırı derecede artmakta

hem de elde edilen kuralların önemi ve ilginçliği azalmaktadır.

Örneğin bir veri tabanında cinsiyet niteliği sadece iki değer (bay, bayan) alabilirken, öğrenim durumu niteliği yedi farklı değer (ilk, orta, lise, ön lisans, lisans, yüksek lisans, doktora) alabilmektedir. Böyle durumlara sahip bir veri seti üzerinde kullanılacak olan sabit bir minimum destek değeri, elde edilen kuralların ilginçliğini ve değerini düşürecektir. Destek değerinin yüksek seçilmesi, öğrenim durumu ile ilgili hiçbir kuralın üretilmemesine, destek değerinin düşük verilmesi ise cinsiyet niteliğinin elde edilen tüm kurallar içerisinde yer almasına, anlamlı veya anlamsız birçok kural oluşmasına sebep olacaktır.

3.2. Önerilen yöntem

Yukarıda verilen problemin çözümü için Veri madenciliği problemlerinde yaygın olarak normalizasyon işlemi kullanılmaktadır. Ancak, Birliktelik Kuralı problemimde normalizasyon işlemi çözüm üretmemektedir. Bu nedenle, yukarıda verilen problemin çözümüne yönelik olarak, veri setindeki her nitelik için ayrı ayrı minimum destek değeri kullanan yeni bir yaklaşım önerilmiştir. Tablo 2'de, bir okuldaki öğrencilerle ait bir veri seti örneği görülmektedir. Bu tabloya göre birliktelik kuralları oluşturulmaya çalışıldığında, minimum destek değerinin seçimi nitelikler arasındaki ölçek farkından dolayı sorun oluşturabilmektedir. Seçilecek minimum destek değerinin yüksek olması durumunda, "gelir durumu" ile ilgili hiçbir kuralın elde edilememesi sorunu ortaya çıkabilmektedir. Minimum destek değerinin düşük olduğu durumlarda ise "cinsiyet" ve "internet kullanımı" gibi sadece iki farklı değer alan niteliklerin her kuralda yer alması ve ilginç olmayan değersiz kuralların elde edilmesi durumu ortaya çıkmaktadır. Çünkü veri setinde "internet", "cinsiyet" ve "başarı durumu" nitelikleri sadece iki farklı değer alırken "yaşam" niteliği dört, "gelir durumu" niteliği ise üç farklı değer almaktadır. Nitelikler arasındaki bu ölçek farklılığı, nicel veya nitel birliktelik kuralları için problem oluşturmaktadır.

Tablo 2. Öğrenci yaşam ve başarı durumu

ID	Cinsiyet	Gelir	İnternet	Yaşam	Başarı
1	Bayan	Düşük	Yok	Yurt	Başarısız
2	Erkek	Orta	Var	Akraba	Başarılı
3	Erkek	Orta	Var	Arkadaş	Başarısız
4	Erkek	Düşük	Var	Yurt	Başarısız
5	Erkek	Yüksek	Yok	Arkadaş	Başarılı
6	Bayan	Yüksek	Yok	Akraba	Başarısız
7	Bayan	Orta	Yok	Aile	Başarılı
8	Bayan	Düşük	Var	Yurt	Başarısız
9	Erkek	Düşük	Var	Yurt	Başarılı
10	Bayan	Yüksek	Var	Arkadaş	Başarısız

Bu problemin çözümü için, algoritmaya girilen minimum destek değeri parametresini her nitelik üzerinde farklı olacak şekilde kullanan çoklu destek değeri kullanılması önerilmektedir. $I = \{I_1, I_2, \dots, I_n\}$ veri setine ait nitelikler olmak üzere her bir niteliğe ait minimum destek sayısı Denklem 1'deki formül ile hesaplanması önerilmektedir.

$$Minsup(i) = \frac{|T|.s.2}{100.\varphi(i)} \quad (1)$$

formülde,

$Minsup(i)$ = i niteliği için minimum destek sayısı,
 $|T|$ = Kayıt sayısı,
 s = % olarak destek değeri,
 $\varphi(i)$ = i niteliğin aldığı farklı değer sayısı
 olarak verilmektedir.

Örneğin Tablo 2’de verilen veri seti için “yaşam” niteliğine ait destek sayısı;

$$Minsup(yaşam) = \frac{10.40.2}{100.4} = 2$$

olarak hesaplanmaktadır.

Tablo 3’te her bir niteliğin aldığı değerler ve her bir nitelik için kullanılacak minimum destek sayısı verilmektedir. Ayrıca veri setine dönüşüm uygulanarak, Apriori algoritması uygulanabilecek mantıksal formata dönüştürülmüştür. Bu şekilde her bir niteliğin aldığı farklı değerler o niteliğin bir alt niteliğini oluşturmakta ve alt niteliklere de o niteliğe ait minimum destek değeri uygulanmaktadır.

Tablo 3. Nitelikler ve %40 destek değeri için her bir niteliğin destek sayıları (d).

ID	Cinsiyet d=4		Gelir d=2			İnternet d=4		Yaşam d=2				Başarı d=4	
	Bayan	Erkek	Düşük	Orta	Yüksek	Yok	Var	Aile	Arkadaş	Akraba	Yurt	Başarısız	Başarılı
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0
2	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1
3	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0
4	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0
5	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	1
6	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	1	0
7	1	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	1
8	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0
9	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1
10	1	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	1	0

3.3. Kuralların oluşturulması

Tablo 3'te elde edilen 10x13 boyutundaki veri setine, her niteliğe ayrı destek değeri uygulanacak şekilde Apriori algoritması uygulanmaktadır. Algoritmanın birinci adımında, her niteliğin ayrı ayrı destek değerleri

hesaplanmakta ve minimum destek değerini sağlamayan nitelikler veri setinden elenmektedir. Tablo 4'te, her bir alt niteliğe ait destek değerleri ile o niteliğin minimum destek değerleri karşılaştırılmalı olarak verilmektedir. Burada H alt niteliği minimum destek değerini sağlamadığı için aday nesne kümesinden elenmektedir.

Tablo 4. C1-Bir elemanlı aday nesne kümesi

Nitelik	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
Destek Sayısı	5	5	4	3	3	4	6	1	3	2	4	6	4
Minimum Destek	4	4	2	2	2	4	4	2	2	2	2	4	4

Apriori algoritmasının ikinci adımında H alt niteliği elendikten sonra kalan alt niteliklerin tüm ikili birliktelikleri üretilmektedir. Daha sonra, oluşturulan bu ikili birlikteliklerin destek değerleri hesaplanmaktadır. Bu destek değerleri daha sonra minimum destek değerleri karşılaştırıldığında, minimum destek değerini sağlamayan ikili birliktelikler aday kümeden çıkarılır. İkili ve daha sonra elde edilecek birliktelikler minimum destek değeri ile karşılaştırılırken alt niteliklere ait birden fazla minimum destek değeri elde edildiği için bu

destek değerlerinden küçük olan değer minimum destek değeri olarak kabul edilmektedir. Örneğin ikili birliktelikte yer alan (A-E) ikili birlikteliği için, "A" alt niteliğe ait minimum destek değeri 4 ve "E" alt niteliğine ait minimum destek değeri 2 olduğu görülmektedir. Bu iki niteliğin birlikteliğinde minimum destek değeri olarak "E" niteliğin destek değeri daha küçük olduğu için 2 kabul edilerek algoritmaya yürütülmektedir. Minimum destek değerinin altında kalan alt nitelikler elenerek bu şekilde algoritma sürdürülmektedir.

Tablo 5. C2-İki elemanlı aday nesne kümesi

Nitelik	Destek Sayısı	Min. Destek	Nitelik	Destek Sayısı	Min. Destek	Nitelik	Destek Sayısı	Min. Destek
A-B	0	4	C-E	0	2	E-M	1	2
A-C	2	2	C-F	1	2	F-H	0	4
A-D	1	2	C-G	3	2	F-I	1	2
A-E	2	2	C-I	0	2	F-J	1	2
A-F	3	4	C-J	0	2	F-K	1	2
A-G	2	4	C-K	4	2	F-L	2	4
A-I	1	2	C-L	3	2	F-M	2	4
A-J	1	2	C-M	1	2	G-I	2	2
A-K	2	2	D-E	0	2	G-J	1	2
A-L	4	4	D-F	1	2	G-K	3	2
A-M	1	4	D-G	2	2	G-L	4	4
B-C	2	2	D-I	1	2	G-M	2	4
B-D	2	2	D-J	1	2	I-J	0	2
B-E	1	2	D-K	0	2	I-K	0	2
B-F	1	4	D-L	1	2	I-L	2	2
B-G	4	4	D-M	2	2	I-M	1	2
B-I	2	2	E-F	2	2	J-K	0	2
B-J	1	2	E-G	1	2	J-L	1	2
B-K	2	2	E-I	2	2	J-M	1	2
B-L	2	4	E-J	1	2	K-L	3	2
B-M	3	4	E-K	0	2	K-M	1	2
C-D	0	2	E-L	2	2	M-L	0	4

Apriori algoritması bu şekilde yürütüldüğünde Tablo 6'de görülen 4 elemanlı

yoğun nesne kümeleri birliktelik kuralı üretmek için elde edilen son yoğun küme olarak elde

edilmektedir. Tabloda görüldüğü üzere 4 elemanlı 3 farklı yoğun nesne kümesi elde edilebilmiştir. Bu durum daha fazla sayıda güven değeri yüksek ve lift değeri uygun kurallar üretilebilmesine olanak sağlamaktadır.

Tablo 6. L4 Dört elemanlı yoğun nesne kümesi

Nitelik	Destek Sayısı	Min. Destek
A-C-K-L	2	2
B-C-G-K	2	2
C-G-K-L	2	2

Tablo 7’de tekli destek değeri ile çoklu destek değeri kullanımı sonucunda elde edilen yoğun nesne kümeleri karşılaştırmalı olarak verilmektedir. Algoritma %40 minimum destek değeri ile işletildiğinde, önerilen yöntem Denklem 1’e göre her bir niteliğe ait destek sayısını ayrı ayrı hesaplamakta ve algoritma yürütülmektedir. Tablo 7’de harf kodları yerine veri setine ait gerçek değerler verilmektedir. Tablodan görüldüğü üzere destek değeri %40 olmasına rağmen destek sayısı 2 olan bazı nitelik değerleri de yoğun nesne kümelerine dâhil edilmiştir.

Tablo 7. Tekli ve çoklu minimum destek değerli yoğun nesne kümelerinin karşılaştırılması

Tekli Destek (%40)	Çoklu Destek (%40)
Bayan-Başarısız : Destek=4	Bayan-Gelir Düşük-Yurt-Başarısız : Destek=2
Erkek-İnt. Var : Destek=4	Erkek-Gelir Düşük-İnt. Var-Yurt : Destek=2
Gelir Düşük-Yurt : Destek=4	Gelir Düşük-İnt. Var-Yurt-Başarısız : Destek=2
İnt. Var-Başarısız : Destek=4	

Tablo 7’den görüldüğü üzere çoklu destek değeri ile önerilen algoritma, verilen veri seti üzerinde 4 elemanlı yoğun nesne kümeleri üretebilirken klasik birliktelik kuralı algoritması en fazla 2 elemanlı yoğun nesne kümeleri üretebilmiştir. Bu durum, nicel birliktelik kurallarında çoklu destek değeri kullanılarak ilginç ve değerli kuralların üretilebilmesinin

mümkün olduğunu göstermektedir. Tablo 7’de verilen yoğun nesne kümeleri için %80 güven değeri ile kurallar elde edildiğinde her iki yöntem için de elde edilen kurallar Tablo 8’de görülmektedir. Çoklu destek değeri ile elde edilen kural sayısı fazla olup bu kurallardan sadece 4 tanesi Tablo 8’de örnek olarak verilmektedir.

Tablo 8. Tekli ve çoklu minimum destek değeri ile elde edilen kurallar

Tekli Destek (%40) Tüm Kurallar	Çoklu Destek (%40) Örnek Kurallar
Bayan→Başarısız : Güven=%80	Düşük-Başarısız→Yurt : Güven=%100 lift= 2.50
Erkek→İnt. Var : Güven=%80	Bayan-Düşük-Yurt→Başarısız : Güven=%100 lift= 2.00
Gelir Düşük→Yurt : Güven=%100	Erkek-Düşük-Yurt→İnt. Var : Güven=%100 lift= 1.67
Yurt→Gelir Düşük : Güven=%100	Bayan-Yurt→Düşük-Başarısız : Güven=%100 lift= 3.33
	...

Tablo 8 incelendiğinde, tekli destek değeri ile minimum güven değerini sağlayan sadece 4 kuralın elde edildiği görülmektedir. Oysa çoklu destek değeri kullanıldığında hem güven değeri hem de ilginçliği yüksek çok güçlü kuralların elde edildiği görülmektedir. Bu kuralların klasik birliktelik kurallarından elde edilemediği tabloda açıkça görülmektedir. Bu kuralların elde edilebilmesi, klasik birliktelik kuralında destek değerinin %40 yerine %20 seçilmesi ile ancak mümkün olabilecektir. Bu durumda, destek değeri

düşük olan çok sayıda ilginç ve değerli olmayan kural üretilecektir.

4. Sonuç

Bu çalışmada, market sepet analizi olarak bilinen birliktelik kuralı algoritmasının nicel veri setleri üzerinde kullanılan türü için yeni bir yaklaşım önerilmiştir. Birliktelik kuralı algoritmasındaki en önemli parametre olan minimum destek değerinin nicel birliktelik kurallarında uygulanması ile ortaya çıkan soruna

çözüm olarak çoklu destek değeri kullanılmıştır. Nicel birliktelik kuralı üretilen veri seti üzerinde her bir niteliğin aldığı değerler farklı ölçekte olduğunda tek bir destek değerinin kullanılması sorun oluşturmaktadır. Minimum destek değerinin yüksek olması veya düşük olması durumunda nitelikler arasındaki birliktelikler ya hiç üretilmemekte ya da değersiz çok sayıda kural ile karşı karşıya kalınmaktadır.

Çoklu destek değeri önerilen bu çalışmada tek destek değeri sorununa çözüm üretmek amacı ile her bir niteliğin aldığı değerlere bağlı olarak farklı minimum destek değerlerinin uygulanması ile bu sorunun çözüldüğü görülmektedir. Böylece birliktelik kuralı algoritmasına giriş olarak tek bir minimum destek değeri girilmekte ancak algoritma her bir niteliğe bu değeri farklı uygulayarak yoğun nesne kümelerini hesaplamaktadır. Bu sayede ölçek farklılığı olan nitelikler arasında ilginçliği yüksek birliktelik kuralların elde edilmesi mümkün kılınmaktadır.

5. Kaynaklar

1. Akpınar, H., (2000), Veri tabanlarında bilgi keşfi ve veri madenciliği, İ.Ü. İşletme Fakültesi Dergisi, **29**, 1-22.
2. Özkan, Y., (2008), Veri Madenciliği Yöntemleri, Papatya Yayıncılık, İstanbul.
3. Agrawal, R., Imielinski, T., Swami, A., (1993) Mining association rules between sets of items in large databases, In ACM SIGMOD Conf. Management of Data, **22**, 207-216.
4. Agrawal, R. and Srikant, R., (1994), Fast algorithms for mining association rules, Proceeding of the 20th Int. Conference on Very Large Database, VLDB, **1215**, 1994.
5. Manila, H., Toivonen, H., Verkamo, A.I., (1994) Efficient algorithms for discovering association rules. In Proceedings of AAAI'94 Workshop on Knowledge Discovery in Databases (KDD'94), 181-192, Seattle, Washington, USA.
6. Houtsma, M., Swami, A., (1995), Set-Oriented mining for association rules in relational databases, Proceedings of the 11th IEEE International Conference on Data Engineering, 25-34, Taipei, Taiwan,
7. Savasere, A., Omiecinski, E., Navathe, S.B., (1998), Mining for strong negative associations in a large database of customer transaction, In Proceedings of the 14th International Conference on Data Engineering, 494-502, Orlando, Florida, USA.
8. Holsheimer, M., Kertsen, M., Manila, H., Toivonen, H., (1995), A perspective on databases and data mining, Proceeding of 1st International Conference on Knowledge and Data Mining, 150-155, Montreal, Kanada.
9. Han, J., Fu, Y., (1995), Discovery of multiple-level association rules from large Databases, Proceedings of the 21nd International Conference on Very Large Databases, 420-431, Zurich, İsviçre.
10. Srikant, R., Vu, Q., Agrawal, R., (1997), Mining association rules with item constraints, In Proceeding of 3rd International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, California, USA.
11. Srikant, R., Agrawal, R., (1996), Mining quantitative association rules in large relational tables, In Proceedings of the 1996 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data, 1-12, Montreal, Quebec, Kanada.
12. Agrawal, R., Srikant, R., (1995), Mining sequential patterns, In Proceedings of the 11th IEEE International Conference on Data Engineering, Taipei, Taiwan, IEEE Computer Society Press.
13. Cai, C.H., Fu, A.W.C., Cheng, C.H., Kwong, W.W., (1998), Mining association rules with weighted items, In Proceedings of 1998 International Database Engineering and Applications Symposium, 68-77, Cardiff, Wales.
14. Chen, Chun-Hao, et al., (2016), Mining fuzzy temporal association rules by item lifespans. Applied Soft Computing, **41**, 265-274.
15. Gosain, A., Maneela B., (2013), A comprehensive survey of association rules on quantitative data in data mining, Information & Communication Technologies (ICT), IEEE Conference on.
16. Ouyang, W., (2012), Mining positive and negative fuzzy association rules with multiple minimum supports. In Systems and Informatics (ICSAI), 2012 International Conference on (pp. 2242-2246). IEEE.
17. Lee, Y. C., Hong, T. P., & Lin, W. Y., (2005), Mining association rules with multiple minimum supports using maximum constraints. International Journal of Approximate Reasoning, **40(1)**, 44-54.
18. Zhao, Y., Sourav S. B., (2015), Association Rule Mining with R. A Survey Nanyang Technological University, Singapore.
19. Berry, M. J., Linoff, G., (1997), Data mining techniques: for marketing, sales, and customer support. John Wiley & Sons, Inc..
20. Sever, H., Oğuz B., (2003), Veri Tabanlarında Bilgi Keşfine Formel Bir Yaklaşım Kısım I: Eşleştirme Sorguları ve Algoritmalar, Bilgi Dünyası **3(2)**, 173-204.

Sosyal Medya Verileri için Etkili Bir Sınıflandırma Yaklaşımı

Fatih Ertam

Fırat Üniversitesi Enformatik Bölümü, 23100 Elazığ/Türkiye
fatih.ertam@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 08.02.2017; Kabul/Accepted: 10.05.2017)

Özet

Sosyal medyanın kullanım oranlarının hızlı bir şekilde artması, sosyal medya madenciliği kavramının gelişmesine sebep olmuştur. Günümüzde sosyal medya araçlarından birisi olan Facebook, kullanıcı sayısı ve günlük aktivite açısından diğer sosyal medya araçlarına göre lider konumdadır. Bu çalışmada Facebook verilerinden oluşturulmuş bir veri seti üzerinde sınıflandırıcı modelleri uygulanarak etkili bir sınıflandırıcı modeli seçilmeye çalışılmıştır. Sınıflandırıcı modelleri olarak bayes ağ, çok katmanlı algılayıcı ağlar, ardışık minimal optimizasyon ve uç öğrenme makinesi kullanılmıştır. Uç öğrenme makinesi içerisinde kullanılan gizli katman hücre sayısının seçimi için bir ile yüz arasında ki tüm değerler alınarak birden fazla aktivasyon fonksiyonu ile çalışma yapılmıştır. Sosyal medya madenciliği yapılabilmesi için etkili ve hızlı bir sınıflandırıcı yöntemi önerilmeye çalışılmıştır.

Anahtar kelimeler: Sosyal Medya Madenciliği, Makine Öğrenmesi, Uç Öğrenme Makineleri, Sınıflandırma Modelleri

An Effective Classification Approach for Social Media Data

Abstract

The rapid increase in social media usage rates has led to the development of the social media-mining concept. Today, one of the social media tools, Facebook is a leader in terms of number of users and daily activity compared to other social media tools. In this study, an effective classifier model was tried to be chosen by applying classifier models on a data set created from Facebook data. BayesNET, multilayer perceptron, sequential minimal optimization and extreme learning machines are used as classifier models. For the selection of the number of hidden layer cells used in the extreme learning machine, all values between one and one hundred were taken and worked with more than one activation function. Efforts have been made to provide an effective and rapid classification method for social media mining.

Keywords: Social Media Mining, Machine Learning, Extreme Learning Machines, Classification Models

1. Giriş

Sosyal Medya kavramı günümüzde birçok işletme yöneticisinin gündeminin en başında gelmektedir [1]. İnternet üzerindeki kullanıcı sayısı her geçen gün hızlı bir şekilde artış göstermektedir. Araştırma sitelerinden Statista'ya göre 2020 yılında internet kullanıcı sayısı 2.95 milyar seviyesine ulaşacaktır [2]. Sosyal medyanın kullanım oranlarının artması internet kullanımını da doğrudan artırmaktadır. Özellikle popüler sosyal medya araçlarından Facebook, kullanım oranı olarak uzun zamandır liderliğini korumaktadır. Aynı istatistik sitesinden alınan veriye göre 2016 yılının son çeyreğinde Facebook 1.86 milyar aylık aktif kullanıcı sayısına

ulaşmıştır [3]. Sosyal medyanın yüksek kullanım oranları özellikle reklam alanında çalışan firmalar için oldukça cezbedici bir hal almıştır. Hızlı gelişimi göz önüne alındığında, sosyal medya markaların yakın gelecekte müşterilerine ulaşması için en önemli medya kanalı haline gelebileceği görülmektedir [4], [5]. Veri madenciliği teknikleri kullanılarak tahmini bilgilerin işlenmemiş verilerden çıkarılması sağlanabilir [6]. Sosyal medya madenciliği yeni bir araştırma başlığının ortaya çıkmasını sağlamıştır. Sosyal medya madenciliği, sosyal medya madenciliğinin temellerini ve potansiyellerini anlamak için tutarlı bir platform

sağlayabilmek adına sosyal medya, sosyal ağ analizi ve veri madenciliğini bütünleştirir. Sosyal medya verilerinden kaynaklanan benzersiz sorunları tanıtır ve temel kavramları ortaya çıkan sorunları ve ağ analizi ile veri madenciliği için etkili algoritmalar sunar [7].

Yapılan çalışma ile Facebook verilerinin olduğu bir veri seti üzerinde veri madenciliği yaklaşımları kullanılarak denetimli öğrenme yaklaşımı gerçekleştirilmiştir. Çalışma için UCI veri tabanında bulunan veri seti kullanılmıştır [8]. Moro ve ark. yapmış olduğu çalışma için elde ettikleri veri seti 19 öznitelikten oluşmaktadır [9]. Moro ve ark. bir model geliştirilmeye çalışılarak modelin tahmini değerinin ölçülmesine, model tarafından öngörülen değer ile gerçek değerinin arasındaki farkın değerlendirilmesine çalışılmıştır. Aynı veri seti kullanılarak yapılan çalışmada ise tüm öznitelik değerleri kullanılarak daha önce sıklıkla kullanılan bayes ağ, çok katmanlı algılayıcı ağlar, ardışık minimal optimizasyon gibi sınıflandırıcılar ile doğruluk oranı test edilmiş hem de daha yeni bir sınıflandırıcı olarak kabul edebileceğimiz uç öğrenme makinelerinin farklı aktivasyon fonksiyonları ile modelleme yapılmıştır.

Çalışmanın ikinci bölümünde elde edilen veri setinin özelliklerinden bahsedilmiştir. Aynı zamanda kullanılan veri madenciliği modellerinden söz edilerek karşılaştırma için kullanılan metriklerin neler olduğu belirtilmiş ve matematiksel işlevlerine yer verilmiştir. Üçüncü bölümde yapılan deneysel çalışmaların sonuçları birbirleriyle kıyaslanarak hem grafiksel hem de tablo halinde sunulmuştur. Son bölümde elde edilen sonuçlar yorumlanmış ve ileriki çalışmalarda nasıl ilerlenebileceğine dair bir yol haritası çizilmeye çalışılmıştır.

2. Materyal ve Metot

2.1 Veri seti

Bu çalışmada kullanılan veri seti UCI veri tabanından alınmıştır [8]. Bu veri setinde toplam 500 kayıt bulunmaktadır. Veri seti 19 Adet öznitelige sahiptir. Veri setinde bulunan tip özniteligi sınıf olarak seçilmiştir. Facebook’ da

kullanılan durum, fotoğraf, bağlantı ve video olmak üzere 4 sınıf bulunmaktadır.

Kullanılan özniteliklere ait açıklamalar Tablo-1 de verilmiştir.

Tablo 1. Kullanılan öznitelikler ve açıklamaları

No	Açıklaması
1	Toplam beğenilen sayfa sayısı
2	Kategori
3	Gönderinin yayınlandığı ay (1-12)
4	Gönderinin yayınlandığı gün (1-7)
5	Gönderinin yayınlandığı saat (1-24)
6	Reklam için ödeme yapıp yapılmadığı (1,0)
7	Gönderiyi gören tekil kişi sayısı
8	Gönderiye tıklanıp görüntülenme sayısı
9	Gönderide her hangi bir yeri tıklayan tekil kişi sayısı
10	Gönderide her hangi bir yeri tıklayan kişi sayısı
11	Gönderideki her hangi bir yere tıklanma sayısı
12	Sayfayı beğenen kişilerin toplam sayısı
13	Sayfayı beğenen kişilerin sonradan erişim sayısı
14	Sayfayı beğenen ve gönderiye katılan kişi sayısı
15	Gönderideki yorum sayısı
16	Gönderideki beğeni sayısı
17	Gönderinin paylaşım sayısı
18	Beğeni, yorum ve paylaşımların toplamı
19	Tip (Durum, Fotoğraf, Link, Video)

2.2 Kullanılan sınıflandırıcılar

Çalışma için sınıflandırıcı model olarak kullanılan bayes ağ (BA), ardışık minimal optimizasyon (AMO), çok katmanlı algılayıcı ağ (ÇKAĞ) ve uç öğrenme makineleri (UÖM) kullanılarak performansları test verisi için doğruluk oranlarına göre karşılaştırılmıştır.

2.2.1 Bayes ağ (BayesNET)

BayesNET veya BayesAĞ olarak adlandırabileceğimiz sınıflandırıcı Bayes teoremine göre çalışmaktadır. Bayes teoremi iki farklı olaya bağlı olarak olasılık hesabına dayanan bir teorem olarak karşımıza çıkmaktadır. Birbirinden bağımsız X ve Y olayları için iki olayın aynı anda oluşma olasılığı iki olayın ayrı ayrı oluşma olasılıkları çarpımına eşittir. Bir birine bağlı olaylar için bu olasılık Denklem-1 de verildiği şekilde elde edilmektedir:

$$P(X \wedge Y) = P(X) * P(X|Y) \quad (1)$$

Denklem-1 X ve Y durumlarının birlikte olma ihtimalini vermektedir. Denkleme göre $P(X|Y)$, Y olayına ait durumun bilinmesi halinde X olayının meydana gelme ihtimalini verir. Bu durumda Bayes teoremi Denklem-2 de verildiği gibi gösterilebilir.

$$P(X \wedge Y) = P(X) * P(X|Y) = P(Y) * P(Y|X) \quad (2)$$

$$P(X|Y) = \frac{P(X) * P(Y|X)}{P(Y)}$$

BA algoritması ile zor problemler verimli ve güvenilir bir şekilde çözülebilmesi amacıyla var olan yöntemlerin geliştirilmesi ile ortaya çıkmıştır. BA algoritmasının denklemi aşağıda verildiği şekilde kullanılmaktadır [10].

$$p(X) = \prod_{i=0}^{n-1} p(X_i | \pi_i) \quad (3)$$

2.2.2 Ardışık minimal optimizasyon

AMO, destek vektör makinesi sınıflandırıcısının eğitilmesi esnasında meydana gelen ikinci dereceden programlama probleminin çözümü için kullanılan bir yöntemdir [11]. Destek vektör makinelerinde oluşan ikinci dereceden programlama problemi denklem-4 de gösterildiği şekilde ifade edilmektedir.

$$\max_{\alpha} \sum_{i=1}^n \alpha_i - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n y_i y_j K(x_i x_j) \alpha_i \alpha_j \quad (4)$$

Denklemde i değerinin 1 ile n ' e kadar tüm değerleri için α değerinin $0 \leq \alpha_i \leq C$ aralığında olması gerekir. Aynı zamanda α_i ve y_i değerlerinin çarpımlarının toplamının sıfır olması gerekir. Bu algoritma ile destek vektör makinelerinin eğitilmesinde meydana gelen ikinci dereceden programlama problemini iteratif olarak daha küçük alt problemlere bölünmeye çalışılır. Elde edilecek olan küçük alt problemler lagrange çarpanı barındırmaktadır. Denklemde α_1 değerinin sıfırdan büyük eşit olması durumunda ve α_2 değerinin C değerinden küçük eşit olması

durumunda denklem-5 de verildiği gibi olmaktadır.

$$y_1 \alpha_1 + y_2 \alpha_2 = k \quad (5)$$

Bu durumdan sonra tek boyutlu ikinci dereceden fonksiyonun minimum değeri bu aşamadan sonra bulunmalıdır. Bu amaçla önce problem için uygun bir α_1 ve α_2 çarpanı seçilmekte ve (α_1, α_2) çiftinin optimize edilmektedir. Bu durum istenilen yakınsama değeri bulunulana kadar devam ettirilir.

2.2.3 Çok katmanlı algılayıcı ağlar

ÇKAĞ, girdi katmanını ara katman ve çıktı katmanından oluşan doğrusal olmayan aynı zamanda geriye yayılım modeli olarak da bilinen bir yapay sinir ağı tekniğidir [12]. Girdi katmanından verilen veri herhangi bir işleme tabi tutulmadan bir sonraki katmana iletilir. Bir katmandaki bütün iş akışı bir üst katmadaki işleyişe bağlı olduğu için veri akışı sürekli ileriye doğru yapılmaktadır. ÇKAĞ' de amaç ağın istenilen çıktısı ile üretilen çıktısı arasındaki hatayı olabildiğince düşürmektir. Ağın eğitimi sırasında girdi ve girdilere karşılık üretilen çıktı değerleri verilir. Ağın görevi her giriş için o girişe karşılık gelecek olan çıkışı üretmektir. Kullanılan eğitim yöntemine göre ağın çıkışı ile elde edilmek istenilen çıkış arasındaki hata tekrar tekrar geriye doğru yayılarak hata en düşük değerini alıncaya kadar ağın ağırlıkları güncellenir. Gizli katmanda bulunan her j nöronu w_{ji} bağlantı ağırlığının giriş değerlerinin çarpımının toplamıdır. Çıkış olan y_j bu toplamın bir fonksiyonudur. Denklem-6 da bu durum matematiksel olarak gösterilmiştir.

$$y_i = f\left(\sum w_{ji} x_i\right) \quad (6)$$

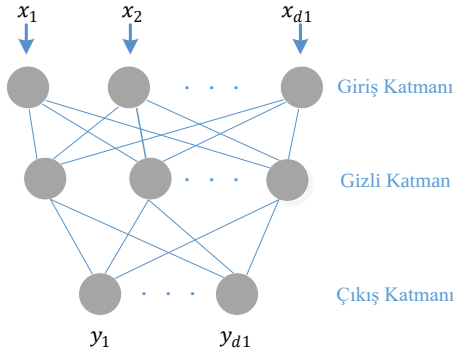
Denklem-6 da verilen f bir aktivasyon fonksiyonudur ve nörona etki eden işaretlerin ağırlıklı toplamını için bir çıkış değeri oluşturur. Çıkış için istenilen değer ile elde edilen değer arasındaki farkların kareleri toplamı olan e Denklem-7 de verildiği gibi ifade edilebilir.

$$e = \frac{1}{2} \sum_j (y_j^* - y_j)^2 \quad (7)$$

Denklem-7 de verilen y_j^* , j . çıkış nöronunun üretilen değeri; y_j ise j . çıkış nöronunun istenilen değerini ifade etmektedir.

2.2.4 Uç öğrenme makinesi (extreme learning machine)

Daha önce bahsedilen sınıflandırma algoritmalarının yanında daha yeni ve gelişmekte olan UÖM, Huang ve ark. tarafından 2004 yılında önerilmiştir [13]. Diğer ileri beslemeli yapay sinir ağlarından farklı olarak UÖM hata fonksiyonuna göre ağırlığı sürekli olarak ayarlamak zorunda değildir. Gizli katmanda bulunan nöronların öğrenme parametreleri rasgele bir şekilde oluşturulurken, çıktı ağırlıkları Moore-Penrose genelleştirilmiş ters matrisi hesaplanarak belirlenir. Bu nedenle eğitim hızı ve genelleme doğruluğu yüksektir [14], [15]. Bu nedenlerden dolayı UÖM, sınıflandırma çalışmalarında sıklıkla kullanılmaya başlamıştır. UÖM temel olarak bir giriş, bir gizli katman bir de çıkış katmanı içermektedir. Şekil-1 de UÖM'nin yapısı gösterilmektedir [16].



Şekil 1. Uç öğrenme makinesi yapısı

UÖM ağırlıkları hata fonksiyonuna göre sürekli bir şekilde ayarlama ihtiyacı duymaz. Giriş katmanı ile gizli katman arasındaki öğrenme parametreleri rasgele oluşturularak çıktı ağırlıkları analitik olarak en küçük kareler yöntemi kullanılarak hesaplanır [13]. UÖM'nin

matematiksel çıkarımı şöyle özetlenebilir: $\{(I_n, T_n) | n = 1, 2, \dots, N; I_n \in RW; T_n \in RV\}$ eğitimi verildiğinde I_n giriş vektörü ve T_n her örnek için hedef değer vektörüdür. K gizli düğümleri olduğu düşünülürse UÖM'nin çıktısı Denklem- 8 de verildiği gibi olur.

$$T_n = \sum_{k=1}^K \beta_k G(\omega_k \cdot I_n + b_k)$$

Burada $\omega_k = [\omega_{k1}, \omega_{k2}, \dots, \omega_{kW}]$ $\omega_k = [\omega_{k1}, \omega_{k2}, \dots, \omega_{kW}]^T$ ve $\beta_k = T[\beta_{k1}, \beta_{k2}, \dots, \beta_{kV}]$ $k = 1, 2, \dots, K$ sırasıyla k . gizli katman nöronunun girdi ağırlıklarını ve çıktı ağırlıklarını göstermektedir. b_k ve $G(\omega_k \cdot I_n + b_k)$ k . gizli katman nöronunun eşik değerini ve çıktısını temsil etmektedir. $G(\cdot)$ gizli katmanın aktivasyonudur ve denklem-9 da verildiği gibi gösterilebilir:

$$G(x) = \frac{1}{1 + e^{-(x)}} \quad (9)$$

Denklem-8 $H\beta = T$ gibi daha kısa ve etkili bir şekilde gösterilebilir. H gizli katmanın rasgele üretilmiş çıktı matrisini temsil eder ve denklem-10 da verildiği gibi gösterilebilir.

$$\begin{aligned} H &= \begin{bmatrix} G(\omega_1 \cdot I_1 + b_1) & \dots & G(\omega_K \cdot I_1 + b_K) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ G(\omega_1 \cdot I_N + b_1) & \dots & G(\omega_K \cdot I_N + b_K) \end{bmatrix}_{N \times K} \\ \beta &= \begin{bmatrix} \beta_1^T \\ \vdots \\ \beta_K^T \end{bmatrix}_{K \times V} \\ T &= \begin{bmatrix} y_1^T \\ \vdots \\ y_N^T \end{bmatrix}_{N \times V} \end{aligned} \quad (10)$$

$H\beta = T$ ifadesi en küçük kareler çözümüne göre hesaplanır ve gizli katman ile çıktı katmanı arasındaki ağırlıklar $\hat{\beta} = H^+T$ şeklinde elde edilir. H^+ , H çıkış matrisinin genelleştirilmiş Moore-Penrose matrisi olarak tanımlanmıştır.

UÖM Eğitim algoritmasını şu şekilde özetlemek mümkündür:

- Giriş ağırlıkları ω_k ve gizli katman nöronları b_k rasgele atanır
- Gizli kalman çıkış matrisi H hesaplanır
- En küçük kareler çözümü kullanılarak çıkış ağırlıkları β hesaplanır.

2.3 Sınıflandırıcı modeli için performans karşılaştırması

Veri setine uygulanacak olan sınıflandırıcı modellerin performans karşılaştırılmasının yapılabilmesi için hata matrisinin oluşturulması gerekmektedir. Tablo-2 de veri setinden alınan gerçek değerler ile tahmin edilen değerlerin arasındaki ilişki gösterilmektedir.

Tablo 2. Performans değerlendirmesi için gerçek değerler ile tahmini değerlerin karşılaştırılması

Etiket	Gerçek Pozitif	Gerçek Negatif	Gerçek Toplam
Tahmini Pozitif	Doğru Pozitif (D_p)	Yanlış Pozitif (Y_p)	T_p
Tahmini Negatif	Yanlış Negatif (Y_n)	Doğru Negatif (D_n)	T_n
Tahmini Toplam	(p)	(n)	T

Tablo 2'deki değerlere göre doğru pozitif; gerçekte hem de tahminde pozitif olarak işaretlenen değerleri, yanlış pozitif; gerçekte negatif olmasına rağmen pozitif işaretlenen değerleri, yanlış negatif; gerçekte pozitif olmasına rağmen negatif olduğu tahmin edilen değerleri, doğru negatif ise hem gerçekte hem de tahminde negatif işaretlenen değerleri ifade etmektedir. Sınıflandırmanın doğruluğu Denklem 11'de gösterildiği şekilde hesaplanabilir.

$$\text{Doğruluk Değeri} = \frac{D_p + D_n}{T} \quad (11)$$

3. Deneysel Çalışmalar

Deneysel çalışma için veri setinin %60'ı eğitim için ayrılmış geri kalanı ise test için kullanılmıştır. Sınıflandırıcılara ait performansların karşılaştırılabilmesi amacıyla Weka 3.8.1 ve Matlab 2015a yazılımlarından faydalanılmıştır. Çalışma Windows 2012 Server

işletim sistemine sahip, 16 GB RAM ve 2.93 GHz intel x5570 işlemcili bilgisayar üzerinde hazırlanmıştır. BA algoritması ile yapılan çalışmada test verilerinden 149 tanesi doğru 51 tanesi yanlış olarak sınıflandırılmıştır. Ortalama doğruluk oranı % 74.5 olarak bulunmuştur. ÇKAĞ algoritması ile yapılan çalışmada 172 tane test verisi doğru, 28 tane test verisi yanlış sınıflandırılarak % 86 doğruluk değerine ulaşılmıştır. AMO çalışmasında farklı çekirdek fonksiyonları seçilerek sınıflandırıcıya test verileri verilmiştir. Radyal tabanlı çekirdek fonksiyonu kullanılarak yapılan çalışmada doğruluk oranı %85.5, polinom çekirdek fonksiyonu kullanılması ile %89.5 değerine ulaşılmıştır.

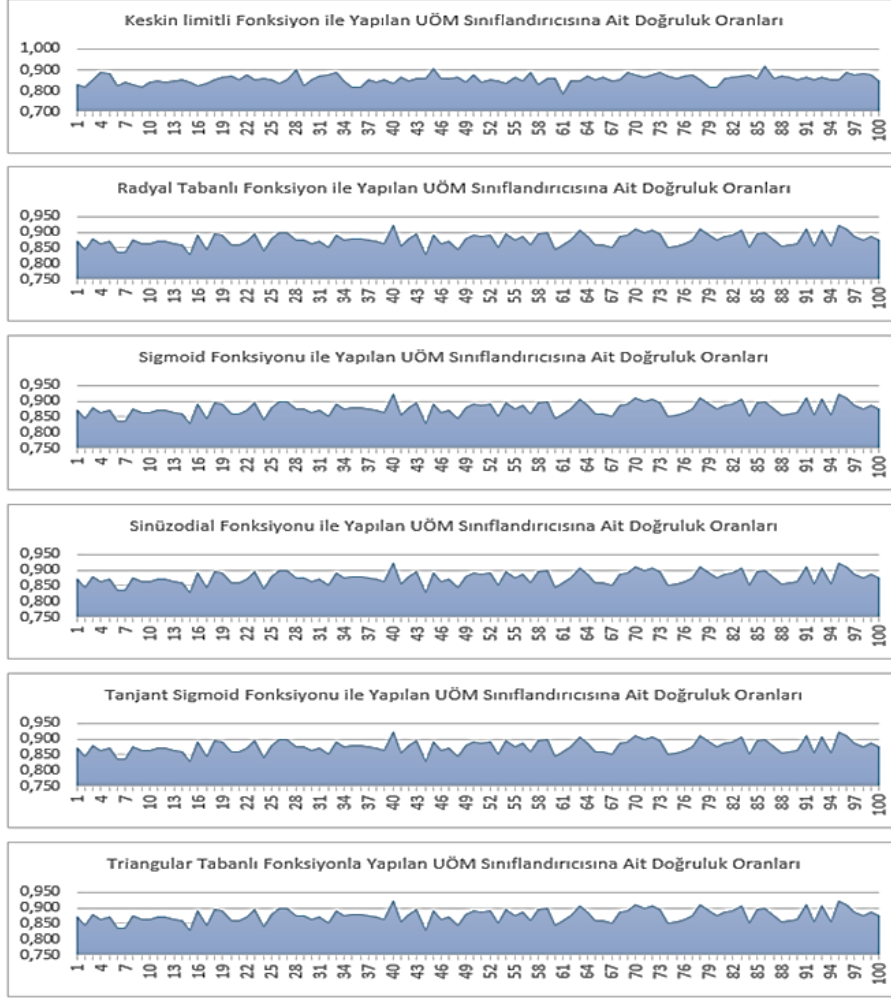
UÖM algoritması ile yapılan çalışmalarda farklı aktivasyon fonksiyonları ile gizli nöron sayıları kullanılarak sınıflandırıcının doğruluk değeri belirlenmeye çalışılmıştır. Bu amaçla 1-100 arasında değişen gizli nöron sayıları; keskin limitli, radyal tabanlı, sigmoid, sinüzoidal, tanjant tabanlı ve triangular tabanlı aktivasyon fonksiyonu kullanılan UÖM sınıflandırıcılarına verilmiştir. Keskin limitli aktivasyon fonksiyonun kullanıldığı çalışma için en yüksek doğruluk oranı 86 gizli nöronun kullanıldığı çalışmada % 91.5, en kötü değer ise 61 gizli nöronun kullanıldığı çalışmada %78 olarak bulunmuştur. Radyal tabanlı aktivasyon fonksiyonun kullanıldığı çalışma için en yüksek doğruluk oranı 54 gizli nöronun kullanıldığı çalışmada % 93.5, en kötü değer ise 29 gizli nöronun kullanıldığı çalışmada %82 olarak bulunmuştur. Sigmoid aktivasyon fonksiyonun kullanıldığı çalışma için en yüksek doğruluk oranı 65 gizli nöronun kullanıldığı çalışmada % 94.5, en kötü değer ise 1 gizli nöronun kullanıldığı çalışmada %82 olarak bulunmuştur. Sinüzoidal aktivasyon fonksiyonun kullanıldığı çalışma için en yüksek doğruluk oranı 27 ve 33 gizli nöronun kullanıldığı çalışmada % 92.5, en kötü değer ise 1 gizli nöronun kullanıldığı çalışmada %77.5 olarak bulunmuştur.

Tanjant Sigmoid aktivasyon fonksiyonun kullanıldığı çalışma için en yüksek doğruluk oranı 26 ve 51 gizli nöronun kullanıldığı çalışmada % 94, en kötü değer ise 2 gizli nöronun kullanıldığı çalışmada %73.5 olarak bulunmuştur. Triangular tabanlı aktivasyon fonksiyonun kullanıldığı

çalışma için en yüksek doğruluk oranı 40 ve 95 gizli nöronun kullanıldığı çalışmada % 92, en kötü değer ise 15 ve 44 gizli nöronun kullanıldığı çalışmada %83 olarak bulunmuştur.

Şekil-2 de farklı aktivasyon fonksiyonlarının 1-100 arasında gizli nöron sayısının değiştirilmesi ile elde edilen doğruluk değerleri gösterilmiştir.

BA, ÇKAĞ, AMO ve UÖM ile yapılan çalışmalarda elde edilen doğruluk değerleri karşılaştırılmalı bir şekilde Tablo 3 de verilmiştir.



Şekil 2. Farklı aktivasyon fonksiyonları ve gizli katman hücre sayıları ile UÖM doğruluk değerleri

Tablo 3. Kullanılan sınıflandırıcıların karşılaştırılması

Metot	Aktivasyon Fonksiyonu	Nöron Sayısı	Doğruluk Yüzdesi
BA	-	-	74.5
ÇKAĞ	-	-	86
AMO	Radyal tabanlı	-	85.5
AMO	Polinom	-	89.5
UÖM	Keskin limitli	86	91.5
UÖM	Radyal tabanlı	54	93.5
UÖM	Sigmoid	65	94.5

4. Sonuçlar ve Tartışma

Sosyal medyanın kullanım oranlarının hızlı bir şekilde artması, sosyal medya madenciliği kavramının gelişmesine sebep olmuştur. Günümüzde sosyal medya araçlarından Facebook

kullanıcı sayısı ve günlük aktivite açısından diğer sosyal medya araçlarına göre lider konumdadır.

Bu çalışmada Facebook verilerinden oluşturulmuş ve herkesin ulaşabileceği bir veri seti üzerinde sınıflandırıcı modeller uygulanarak etkili bir sınıflandırıcı modeli seçilmeye çalışılmıştır. Bu amaçla BA, ÇKAĞ, AMO ve UÖM algoritmalarından faydalanılmıştır. Kullanılan algoritmalarından aktivasyon fonksiyonu olanlar için farklı aktivasyon fonksiyonları ile ayrı ayrı çalışma yapılmıştır.

Yapılan çalışmalarda BA ile elde edilen doğruluk oranının diğer algoritmalarla göre daha düşük olduğu gözlenmiştir. ÇKAĞ ve AMO algoritmalarında elde edilen sonuçların birbirlerine yakın, UÖM ile elde edilen sonuçların ise daha iyi derecede sınıflandırma yaptığı gözlenmiştir. UÖM için farklı aktivasyon fonksiyonlarının 1 ile 100 arasında değişen değerlerde farklı sayıda gizli katman hücrelerine verdiği tepkiler için ayrı bir yazılım hazırlanarak sonuç alınmıştır. En iyi doğruluk oranının %94.5 ile sigmoid aktivasyon fonksiyonunun kullanıldığı ve gizli nöron sayısının 65 seçildiği uç öğrenme makinesi ile bulunduğu görülmüştür.

Sosyal medya verilerinin incelenerek analiz edilmesi ile özellikle bu alanda reklam verebilecek olan firmalar için bu verilerin önemli olduğu hangi sınıfın daha çok tercih edilerek reklam için bu alanda yoğunlaşabileceğinin önemli bir veri olacaktır. İlerleyen çalışmalarda gizli nöron hücre sayısının tespit edilmesinde daha hızlı modelleme tekniklerinden faydalanılarak daha fazla değerin daha hızlı bir şekilde seçilebilmesi hedeflenmektedir.

5. Kaynaklar

1. Kaplan, A. M. ve Haenlein, M. (2010). "Users of the world, unite! The challenges and opportunities of Social Media", *Bus. Horiz.*, **53**, sayı 1, ss. 59–68.
2. Statista, (2016). "Number of Worldwide Social Network Users 2010-2019", *Statista*, [Çevrimiçi].<http://www.statista.com/statistics/278414/number-of-worldwide-social-network-users/>.

3. Statista (2016). "Facebook users worldwide 2016", *statista.com*, [Çevrimiçi].
<http://www.statista.com/statistics/264810/number-of-monthly-active-facebook-users-worldwide/>.
4. Korschun D. ve Du, S. (2013). "How virtual corporate social responsibility dialogs generate value: A framework and propositions", *J. Bus. Res.*, **66**, sayı 9, ss. 1494–1504.
5. Mangold W. G. ve Faulds D. J. (2009). "Social media: The new hybrid element of the promotion mix", *Bus. Horiz.*, **52**, sayı 4, ss. 357–365.
6. Turban E., Sharda R. ve Delen D. (2011). *Decision Support and Business Intelligence Systems*, **8th**.
7. Zafarani, R., Abbasi, M. A. ve Liu H. (2014). *Social Media Mining*. Cambridge: Cambridge University Press.
8. U. M. L. Repository (2016). "Facebook metrics Data Set", www.ics.uci.edu.
9. Moro, S., Rita, P. ve Vala, B. (2016). "Predicting social media performance metrics and evaluation of the impact on brand building: A data mining approach", *J. Bus. Res.*, **69**, sayı 9, ss. 3341–3351.
10. Friedman, N., Geiger, D. ve Goldszmidt, M. (1997). "Bayesian Network Classifiers", *Mach. Learn.*, **29**, ss. 131–163.
11. Platt, J. C. (1998). "Sequential Minimal Optimization: A Fast Algorithm for Training Support Vector Machines", *Adv. kernel methods*, ss. 185–208.
12. Rumelhart, D. E., Hinton, G. E. ve Williams, R. J. (1986). "Learning representations by back-propagating errors", *Nature*, **323**, sayı 6088, ss. 533–536.
13. Huang, G., Zhu, Q. ve Siew, C. (2004). "Extreme Learning Machine: A New Learning Scheme of Feedforward Neural Networks", *IEEE Int. Jt. Conf. Neural Networks*, **2**, ss. 985–990.
14. Huang, G.-B., Zhu, Q. ve Siew C. (2006). "Extreme learning machine: Theory and applications", *Neurocomputing*, **70**, sayı 1–3, ss. 489–501.
15. Huang, G. Bin., Wang, D. H. ve Lan, Y. (2011). "Extreme learning machines: A survey", *Int. J. Mach. Learn. Cybern.*, **2**, sayı 2, ss. 107–122.
16. Ertam F. ve Avcı, E. (2017). "A new approach for internet traffic classification: GA-WK-ELM", *Measurement*, **95**, ss. 135–142.

Gauss Karışım Modeli ve Genlik Spektrumu Öznitelikleri ile Sesteki Gizli Bilginin Sezimlenmesi

Cemal HANILCI

Bursa Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Bursa, Türkiye.
cemal.hanilci@btu.edu.tr

(Geliş/Received: 13.02.2017; Kabul/Accepted:28.04.2017)

Özet

Son yıllarda, dijital verilerin kullanımının önemli ölçüde artması ile dijital ortam verilerinin gizli haberleşme için kullanılması oldukça yaygınlaşmıştır. Bununla birlikte, dijital verilerdeki gizli mesajın tespiti (steganaliz) çalışmaları da aynı ölçüde önem kazanmaktadır. Bu çalışmanın amacı, literatürde konuşma işleme uygulamalarında yaygın olarak kullanılan Gauss karışım modeli (GKM) sınıflandırıcısı ve Mel-frekansı kepstum katsayıları (MFKK) özniteliklerini kullanarak dijital ses (konuşma) dosyalarındaki gizli mesaj varlığını belirlemektir. 4380 adet konuşma sinyalinin kullanıldığı deneysel çalışmalardan MFKK öznitelikleri ve GKM sınıflandırıcısının gizli mesaj tespiti probleminde yaygın olarak kullanılan destek vektör makineleri (DVM) sınıflandırıcısından daha iyi sonuç verdiği görülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Konuşma steganaliz, Steganografi, Gauss karışım modeli, Mel-Frekansı kepstum katsayıları.

Audio Steganalysis Using Gaussian Mixture Models and Magnitude Spectrum Features

Abstract

Recently, increased popularity of using digital data has led to use digital medium for covert communication. On the other hand, steganalysis, detecting the presence of secret messages, has gained great interests. In this work, we aim to develop an audio steganalysis framework using Gaussian mixture model (GMM), widely used classification technique in speech processing applications and Mel-frequency cepstral coefficients (MFCC) features. Experiments conducted on a dataset consisting of 4380 audio signals suggest that GMM classifiers with MFCC features yield promising and encouraging results on audio steganalysis and GMM shows better performance than widely used support vector machines (SVM) classifier.

Keywords: Audio steganalysis, Steganography, Gaussian mixture model, Mel-frequency cepstral coefficients.

1. Giriş

Dijital verilerin (ses, resim, video) kullanımı internetin yaygınlaşması ile daha da popüler hale gelmiştir. Bununla birlikte bu verilerin gizli haberleşme amacı ile kullanımı da aynı ölçüde yaygınlaşmıştır [1]. Steganografi, bir dijital veri içerisine gizli mesaj veya bilgiler saklayarak, alıcıdan başka kimsenin farkedemeyeceği şekilde gönderme sanatıdır [2]. Steganaliz ise,

steganografi yöntemleri ile dijital veriler içerisine gizlenmiş olan gizli mesajın tespit edilmesidir. Steganalizin amacı mesajın içeriğinden çok mesajın varlığının tespit edilmesidir [3].

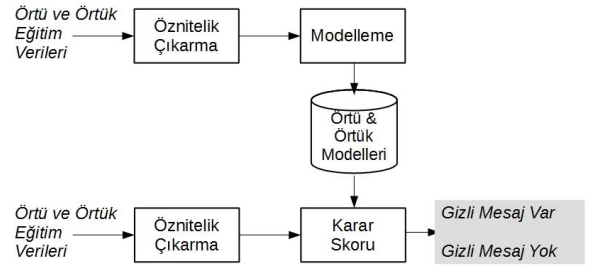
Steganaliz temel olarak hedefli ve hedefsiz olmak üzere iki gruba ayrılır [3]. Hedefli steganaliz yöntemleri, belirli bir veri gizleme yöntemi ile gizlenmiş mesajların varlığının tespit

edilmesini amaçlarken, hedefsiz steganaliz ise, veri gizleme yönteminden bağımsız olarak gizli mesajın tespit edilmesi işlemidir [4]. Dolayısı ile steganaliz, bir dijital verinin örtü (gizli mesaj/bilgi içermeyen) veya örtük (gizli mesaj/bilgi içeren) şeklinde ikiye ayrılması olarak tanımlanabilir. Bu bağlamda steganaliz, aslında test edilecek dijital veriden elde edilen öznitelikler ile eğitim aşamasında oluşturulan modeller karşılaştırma işlemine tabii tutularak bir karar skoru hesaplanır. Karar skoru belirli bir eşik değerden yüksek ise dijital veride gizli mesajın olduğu kararı verilir. Aksi durumda ise gizli mesajın olmadığı kararı verilir. Genel steganaliz sisteminin adımları Şekil 1’de gösterilmiştir.

Literatürde yer alan steganaliz çalışmaları daha çok dijital resim (imge) dosyalarındaki gizli mesajın tespitine yoğunlaşmış olup, ses dosyaları kullanılarak yapılan steganaliz çalışmaları oldukça sınırlı sayıdadır. Konuşma sinyallerindeki gizli mesajın tespiti konusunda bilinen en eski çalışmalardan biri Özer ve diğ. [5] tarafından gerçekleştirilmiştir. Özer ve diğ. [5], konuşmadaki gizli mesajın tespiti için ses kalite ölçütlerini öznitelik olarak kullanmış ve bu öznitelikleri destek vektör makineleri (DVM) sınıflandırıcısı [6] ve doğrusal regresyon sınıflandırıcıları yardımı ile sınıflandırmışlardır. Elde edilen bulgulardan DVM sınıflandırıcısının ses dosyalarındaki gizli mesajın tespitinde regresyon sınıflandırıcısına nazaran daha iyi sonuç verdiğini göstermiştir. Bir başka çalışmada Johnson ve diğ. [7] tarafından ses sinyalinin spektrogramındaki düzgünlükten faydalanılarak elde edilen öznitelikler DVM sınıflandırıcısı kullanılarak gizli mesaj tespiti çalışmaları yapılmıştır. Ru ve diğ. [8] ayrık Wavelet dönüşümü ve doğrusal öngörülü kodlama yöntemleri ile elde edilmiş öznitelikleri DVM sınıflandırıcısı ile kullanarak ses sinyallerinden gizli mesaj varlığının tespiti problemini incelemişlerdir. Fu ve diğ. [9] zaman frekans histogramlarının ilk üç momentini ve bunların wavelet dönüşümünden elde edilen öznitelikleri kullanarak ses sinyallerindeki gizli mesajın tespit edilmesini çalışmışlardır.

Bunun gibi daha birçok çalışmada genel olarak DVM sınıflandırıcısı [6] ve genellikle zaman tanım bölgesi analizinden elde edilen öznitelikler ses dosyalarındaki gizli mesaj

iki sınıflı bir örüntü tanıma problemidir ve genel olarak eğitim ve test olmak üzere iki aşamadan oluşmaktadır. Eğitim aşamasında gizli mesaj içeren (örtük) ve içermeyen (örtü) dijital verilerden öznitelikler çıkarılır ve her bir sınıfa ait (örtü ve örtük sınıfları) birer model eğitilir. Test aşamasında ise gizli mesajın var olup olmadığı varlığının tespit edilmesi problemi incelenmiştir. Bu çalışmada, konuşma işlemede yaygın bir şekilde kullanılan ve ses sinyalinin genlik spektrumundan elde edilen Mel-frekansı kepsitrum katsayıları (MFKK) özniteliklerinin, yine konuşmacı tanıma, duygu durumu tanıma gibi birçok ses işleme tabanlı sınıflandırma problemlerinde yaygın olarak kullanılan Gauss karışım modeli (GKM) sınıflandırıcısı ile ses sinyallerindeki gizli mesaj varlığının tespit edilmesi problemini incelenmektedir.



Şekil 1. Genel steganaliz adımları

2. Gauss Karışım Modeli ile Steganaliz

Steganaliz, bir ses dosyasında gizli mesajın varlığının tespiti, daha önce de belirtildiği gibi aslında iki sınıflı bir örüntü tanıma problemidir. Bu problem aslında iki hipotezden oluşan bir hipotez testi olarak tanımlanabilir. Bir s ses sinyali için bu hipotezler:

- H_0 : s sinyalinde gizli mesaj yoktur
- H_1 : s sinyalinde gizli mesaj vardır.

şeklinde tanımlanabilir. Dolayısı ile bu iki hipotez arasında karar verme işlemi olabilirlik oran testi ile gerçekleştirilebilir ve logaritmik olabilirlik oran skoru

$$\Lambda(s) = \log p(s|H_0) - \log p(s|H_1) \quad (1)$$

şeklinde hesaplanır. $\log p(s|H_0)$ ve $\log p(s|H_1)$ olasılıklarını hesaplayabilmek için, H_0 ve H_1 hipotezlerini temsil edecek istatistiksel modellerin hesaplanması gerekir. Bu amaçla GKM yöntemi [10, 11] kullanılabilir.

GKM ile her bir sınıf (örtü ve örtük sınıfları) M adet ağırlıklandırılmış Gauss yoğunluk fonksiyonunun toplamı olarak

$$p(\mathbf{x}|\lambda) = \sum_{i=1}^M w_i p_i(\mathbf{x}) \quad (2)$$

şeklinde temsil edilir [10,11]. Burada w_i , i . Gauss bileşeninin ağırlığı, $p_i(\mathbf{x})$ ortalaması μ_i , kovaryans matrisi Σ_i olan çok değişkenli Gauss yoğunluk fonksiyonudur. Bütün bir GKM, $\lambda = \{w_i, \mu_i, \Sigma_i\}_{i=1}^M$ şeklinde temsil edilir.

Steganaliz için GKM kullanılırken, örtü ve örtük sınıflarına ait eğitim öznitelik vektörleri kullanılarak, her bir sınıf için $\lambda_{\text{örtü}}$ ve $\lambda_{\text{örtük}}$ ile belirtilen iki adet GKM, beklentinin maksimumlaştırılması algoritması ile en büyük olabilirlik kriterine göre eğitilir [10, 11]. Eğitim aşaması, her bir sınıfa ait GKM parametrelerinin (ağırlık, ortalama ve kovaryans) eğitim verilerinden tahmin edilmesi işlemidir.

Test aşamasında ise, bir ses sinyalinde elde edilen öznitelik vektörleri $\mathbf{Y} = \{\mathbf{y}_1, \mathbf{y}_2, \dots, \mathbf{y}_T\}$ ve örtü ve örtük sınıf GKM modelleri kullanılarak karar skoru şu şekilde hesaplanır:

$$\Lambda(\mathbf{Y}) = L(\mathbf{Y}|\lambda_{\text{örtü}}) - L(\mathbf{Y}|\lambda_{\text{örtük}}) \quad (3)$$

Burada $L(\mathbf{Y}|\lambda)$ logaritmik olabilirlik skoru olup şu şekilde hesaplanır:

$$L(\mathbf{Y}|\lambda_{\text{örtü}}) = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \log p(\mathbf{y}_t|\lambda) \quad (4)$$

3. Materyal ve Metot

Deneyisel çalışmalarda, konuşma ve konuşmacı tanıma çalışmalarında yaygın olarak kullanılan TIMIT¹ veritabanında yer alan toplam 438 farklı erkek konuşmacıya ait toplam 4380 adet örtü ses sinyalleri kullanılmıştır. Her konuşmacı iki tanesi bütün konuşmacılar için ortak olan toplam 10 adet yaklaşık üç saniye uzunluğundaki cümleyi söylemiştir. Cinsiyet farklılıklarından kaynaklanabilecek yanılgıları ortadan kaldırmak amacı ile sadece erkek konuşmacılara ait sesler kullanılmıştır. Örtü ses sinyallerine *steghide* [12] veri gizleme yöntemi ile rasgele üretilmiş metin dosyaları gizlenerek 4380 adet örtük ses sinyali elde edilmiştir. Örtü ve Örtük sınıflarının her birine ait 1000 ses sinyali her bir sınıf için GKM eğitiminde kullanılmıştır.

Geri kalan 3380 sinyal ise test aşamasında kullanılmıştır. Dolayısı ile test aşamasında toplam 6760 adet sına (3380 örtü ve 3380 örtük sına) yapılmıştır. Destek vektör makineleri (DVM) ile yapılan deneylerde de benzer şekilde 1000'er adet örtü ve örtük ses sinyalleri eğitim geri kalan 6760 adet ses sinyali ise test aşamasında kullanılmıştır.

Steganaliz deneylerinde, ses işlemede sıklıkla kullanılan mel-frekans kepsrum katsayıları (MFKK) öznitelikleri kullanılmıştır [13]. MFKK öznitelikleri bir ses sinyalinin 10 ms'lik kısımları örtüşen 20 ms uzunluğunda çerçevelere bölünmesi ile elde edilir. Hamming pencere ile pencerelenen ses sinyallerinin ayrık Fourier dönüşümü alınarak genlik spektrumu hesaplanır. Her bir çerçevenin genlik spektrumu, toplam 27 adet üçgen süzgeçten oluşan ve Mel-ölçeğinde yerleştirilmiş üçgen süzgeç takımından geçirilir. Logaritmik süzgeç çıkışlarının ayrık Cosinüs dönüşümü alınarak her bir çerçeveden toplam 12 adet MFKK öznitelikleri elde edilir.

GKM sınıflandırıcısı ile yapılan deneylerde, örtü ve örtük sınıfların her biri için toplam 256 adet Gauss bileşeninden oluşan modeller toplam 10 EM iterasyonu ile eğitilmiştir. DVM deneylerinde ise örtü ve örtük sınıflara ait eğitim MFKK öznitelikleri LibSVM [14] programı ile doğrusal çekirdek fonksiyonu ile eğitilmiştir.

Steganaliz deneylerinde başarımlık kriteri olarak duyarlılık (sensitivity-SE), özgüllük (specificity-SP) ve doğruluk (accuracy-ACC) kriterleri kullanılmıştır [4]. Bu kriterler hesaplanırken şu parametreler kullanılır:

- Gerçek Negatif (True Negative - DN) : Örtü olarak karar verilen toplam örtü sinyali sayısı
- Gerçek Pozitif (True Positive - GP) : Örtük olarak karar verilen toplam örtük sinyali sayısı
- Yanlış Negatif (False Negative - YN) : Örtü olarak karar verilen toplam örtük sinyali sayısı
- Yanlış Pozitif (False Positive - YP) : Örtük olarak karar verilen toplam örtü sinyali sayısı

Bu parametreler ile duyarlılık (SE)

¹ <https://catalog.ldc.upenn.edu/ldc93s1>

$$SE = \frac{GP}{GP + YN} \times 100 \quad (5)$$

$$Özgüllük (SP) = \frac{GN}{GN + YP} \times 100 \quad (6)$$

$$Doğruluk (ACC) \text{ ise } ACC = \frac{GN + GP}{GN + YP + GP + YN} \times 100 \quad (7)$$

şeklinde hesaplanır.

4. Bulgular

GKM ve DVM ile elde edilen steganaliz sonuçları Tablo I de gösterilmiştir. Tabloda iki sınıflandırıcı ile elde edilen sonuçlardan en iyi olan değerler kalın font ile gösterilmiştir. Tablodan görüldüğü üzere, GKM sınıflandırıcısı ile her üç başarımlık kriteri açısından da DVM sınıflandırıcısından daha iyi steganaliz sonuçları elde edilmiştir. GKM sınıflandırma yöntemi DVM sınıflandırıcısından duyarlılık ve doğruluk kriterleri açısından sırası ile %21 ve %11 ve daha iyi steganaliz başarımlık elde edilmiştir. Fakat özgüllük kriteri açısından, DVM sınıflandırıcısı ile GKM sınıflandırıcıları oldukça yakın performans göstermektedir.

Tablo 1’de verilen sonuçlardan da görüldüğü gibi, örtük seslerin tanınma oranı, örtü seslerin tanınma oranına nazaran daha yüksektir. Bu sonuca duyarlılık kriteri baz alınarak ulaşılmaktadır. Çünkü duyarlılık kriteri, eşitlik (5) de görüldüğü gibi sadece örtük seslerin tanınması kriteridir.

Tablo 1. GKM ve DVM sınıflandırıcıları ile steganaliz sonuçları

Kriter	GKM	DVM
SE (%)	52,72	43,52
SP (%)	38,87	38,96
ACC (%)	45,79	41,24

Özgüllük kriteri ise, örtü seslerin tanınması kriterine karşılık gelmektedir. Bu gerçekten yola çıkarak örtük seslerin (gizli mesaj içeren), örtü seslere (gizli mesaj içermeyen) nazaran her iki sınıflandırma yöntemi için daha yüksek bir başarımlık tespit edildiği görülmektedir. Doğruluk kriteri ise hem örtük hem de örtü seslerin tanınma oranları ile hesaplanmaktadır ve her iki bilgiyi de içermektedir. GKM yöntemi, duyarlılık ve

doğruluk kriterleri için DVM yönteminden daha iyi performans göstermektedir.

Tablo 1 de elde edilen sonuçlar daha önce de belirtildiği gibi örtü ve örtük ses dosyalarından rasgele seçilen 1000'er adet eğitim verisi ile elde edilmiştir. GKM sınıflandırıcısının steganaliz performansının genelleştirilebilirliğini kontrol etmek amacı ile örtü ve örtük sınıflarına ait ses dosyalarından eğitim için kullanılan 1000'er adet ses dosyasının rasgele seçilmesi işlemi 25 kez tekrarlanmıştır. Steganaliz deneylerinin 25 kez tekrarlanması sonucunda elde edilen başarımların ortalaması ve bu başarımların standart sapmaları Tablo 2 de verilmiştir. Görüldüğü gibi GKM sınıflandırıcısı ile DVM sınıflandırıcısından çok daha yüksek steganaliz başarımları elde edilmektedir. Bu bulgular da steganaliz için ses işlemede özellikle konuşmacı tanımda yaygın olarak kullanılan GKM sınıflandırıcısının steganaliz için de uygun bir sınıflandırma yöntemi olduğunu göstermektedir. Tablo 1’de elde edilen sonuçlara benzer şekilde, örtük seslerin örtü seslere nazaran daha yüksek başarımlık ile tespit edilebildiği Tablo 2’de de görülmektedir.

Tablo 2. Steganaliz deneylerinin 25 kez tekrarlanması ile elde edilen ortalama başarımlar ve standart sapmaları

Kriter	GKM	DVM
SE (%)	46,71 ± 3,68	41,33 ± 1,04
SP (%)	43,85 ± 3,53	40,90 ± 0,94
ACC (%)	45,28 ± 0,46	41,12 ± 0,28

5. Sonuçlar

Bu çalışmada, veri gizleme yöntemi ile gizli mesaj içeren ses dosyalarının tespit edilmesi problemi olan konuşma steganalizi problemi ele alınmıştır. Görüntü steganaliz problemine nazaran daha az çalışmanın yapıldığı konuşma steganalizi için konuşmacı tanıma probleminde yaygın olarak kullanılan Gauss karışım modeli (GKM) sınıflandırıcısının steganaliz problemine kullanılması önerilmiştir. 4380 adet örtü ve steghide veri gizleme algoritması ile oluşturulmuş 4380 adet örtük ses sinyallerinin ve Mel-frekans kepsral katsayıların kullanıldığı deneysel çalışmalardan GKM sınıflandırıcısının popüler iki sınıflı sınıflandırma yöntemi olan destek vektör makineleri (DVM) sınıflandırıcısından

daha yüksek başarımlar verdiği görülmüştür. Elde edilen sonuçlardan (Tablo 1 ve Tablo 2), sınıflandırma yönteminden bağımsız olarak örtük seslerin daha kolay bir şekilde tespit edilebildiği görülmüştür.

6. Kaynaklar

1. Petitcolas, F. A. P., Anderson, R.J., and Kuhn, M.G. (1999). Information Hiding--A Survey. *Proceedings of the IEEE*, **87(7)**: 1062-1078.
2. Mavel, L.M. (2005). Information Hiding: Steganography and Watermarking. *Optical and Digital Techniques for Information Security*, New York, Springer New York, 113-133.
3. Böhme, R. (2010). Principles of Modern Steganography and Steganalysis. *Information Security and Cryptography*, 11-77.
4. Ghasemzade, H., Khass, T.M. and Arjmandi, M. K. (2016). Audio steganalysis based on reversed psychoacoustic model of human hearing. *Digital Signal Processing*, **51**: 133-141
5. Özer, H., Avcıbaş, İ., Sankur, B. and Memon, N.(2003). Steganalysis of audio based on audio quality metrics. *Electronic Imaging, International Society for Optics and Photonics*.
6. Burges, C. J. C. (1998). A Tutorial on Support Vector Machines for Pattern Recognition. *Data Mining and Knowledge Discovery*, **2**: 121-167.
7. Johnson, K.M., Lyu, S. and Farid, H.(2005). Steganalysis of Recorded Speech. *Electronic Imaging, International Society of Optics and Photonics*.
8. Ru, X.-M., Zhang, H.-J. and Huang, X. (2005). Steganalysis of audio: attacking the steghide. *International Conference on Machine Learning and Cybernetics*.
9. Fu, J.-W., Qi, Y.-C. and Yuan, J.-S. (2007). Wavelet domain audio steganalysis based on statistical moments and PCA. *International Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition (ICWAPR)*.
10. Reynolds, D.A. and Rose, C. R. (1995). Robust Text-Independent Speaker Identification Using Gaussian Mixture Speaker Models. *IEEE Transactions on Speech and Audio Processing*, **3(1)**: 72-83.
11. Reynolds, D.A., Quatieri, T.F., Dunn, R.B. (2000). Speaker Verification Using Adapted Gaussian Mixture Models. *Digital Signal Processing* **10**(1-3):19-41
12. "Steghide," [Çevrimiçi]. Available: <http://steghide.sourceforge.net/index.php>. [02 Şubat 2017 tarihinde erişilmiştir].
13. Davis, S. B. and Mermelstein, P.(1980). Comparison of parametric representations for monosyllabic word recognition in continuously spoken sentences. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, **28(4)**: 357-366.
14. Chang, C.-C. and Lin, C.J.(2011). LIBSVM: A library for support vector machines. *ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology*, **2(3)**: 1-27

Çok Düşük Frekanslı Sinyallerden Yıldırım Kaynaklı Elektron Yağışı Olaylarının Belirlenmesi

Murat CANYILMAZ*, Mehmet YAŞAR, Esat GÜZEL
Fırat üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü, Elazığ, TÜRKİYE
*mcanyilmaz@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 22.02.2017; Kabul/Accepted: 28.04.2017)

Özet

Bu çalışmada, alt iyonkürede yayılan VLF sinyallerinde oluşan yıldırım kaynaklı olayları otomatik olarak tespit etmek amacıyla dalgacık dönüşümü kullanılarak bir MATLAB yazılımı gerçekleştirilmiştir. Bu yazılımın çıktıları ile gerçek sonuçlar istatistiksel olarak karşılaştırılarak yazılımın güvenilirliği test edilmiştir. Sonuç olarak her ikisinin de aynı güven aralığında olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: VLF sinyalleri, Dalgacık dönüşümü, İstatistiksel analiz

Determination of the Lightning-Induced Electron Precipitation Events from the Very Low Frequency Signals

Abstract

In this study, a MATLAB software with using wavelet transform was carried out to detect the effects of lightning events automatically on the VLF signals propagating at the subionosphere. The reliability of the software has been tested by statistically comparing the actual results with the outputs of this software. As a result, it has been found that both of them are in the same confidence interval.

Keywords: VLF signals, Wavelet transform, Statistical analysis

1. Giriş

Çok düşük frekanslı (VLF) radyo dalgaları (3–30 kHz) Yer-İyonküre dalga kılavuzu olarak adlandırılan yer yüzeyi ile alt iyonküre arasındaki bölgede yayılırlar. VLF Uzaktan Algılama (VLF Remote Sensing) tekniği genellikle alt iyonkürede oluşan bölgesel karışıklıkların konumlarını ve geçici yapılarını açıklamak amacıyla kullanılır. VLF teknikleri kullanılarak; meteor yağmurları, güneş, nükleer ve uzaysal gamma ışın patlamaları, Dünya'nın radyasyon kuşaklarındaki yüksek enerjili elektronların orta enlemlerden ve enerjili elektronların auroral bölgelerden iyonküreye girişi ve yıldırımların VLF yayılımına etkilerini belirlemek gibi birçok çalışma yapılabilmektedir[1-5].

Alt iyonkürede iletkenlik değişimlerinin doğrudan ve dolaylı sebebi yük boşalmaları sonucunda yayılan elektromanyetik dalgalarla. Yıldırımın sebep olduğu elektromanyetik darbeler tarafından yayılan enerji ELF/VLF bandındadır. Bu darbeler VLF radyo atmosferikleri veya 'sferics' olarak bilinirler ve birkaç milisaniyelik zaman diliminde oluşarak çok uzak mesafelere yayılabilirler. Bunların ölçülen özellikleri, yıldırım akımları ve iyonküre özellikleri hakkında bilgi sağlamada kullanılırlar [6,7]. Yıldırımlı fırtınaların sebebi ile ortaya çıkan bu etkiler, ortamdaki elektronların birkaç yüz milisaniye süresince ısınmaları, ~85 km yükseklikte 10–100 sn süren iyonlaşma değişimleri ve elektron sıcaklığındaki değişimler olarak tanımlanabilirler [8-11].

İki tane yıldırım etkili VLF olayı tanımlanmıştır. Bunlar, Erken/Hızlı (Early/Fast) ve Yıldırım etkili elektron yağışı (LEP, Lightning-induced Electron Precipitation) olaylarıdır. Erken/Hızlı VLF olayları, alt iyonküredeki iletkenlik üzerinde bir yıldırım boşalmasının doğrudan etkisi sonucunda oluşur. LEP olayı ise yıldırımın alt iyonküredeki iletkenlik üzerinde dolaylı etkisi sonucunda ortaya çıkar. Yıldırım boşalması sonucunda ortaya çıkan elektromanyetik ısıma manyeto küreye yayılır ve tuzaklanan enerjili elektronlarla etkileşerek bunların alt iyonküreye yağmasına sebep olur ve burada ikinci bir iyonlaşma meydana getirir [12-15]. Bu karışıklar, sinyalinin genliğinde, fazında ani değişimlerle ve sinyalin tekrar normal haline gelmesi için süreyle tespit edilirler.

VLF antenleri ile alınan bu tip sinyaller doğaları gereği oldukça düşük frekanslı olduklarından dolayı gürültüye maruz kalmaları kaçınılmazdır. Bu sebeple sinyal işleme gibi özel uygulamalarda verinin bir şekilde gürültüden ayrıştırılıp anlaşılması gerekmektedir. Bu amaçla tercih edilen yöntem veriyi farklı frekanstaki bileşenlere ayırtıran dönüşüm tekniklerinden dalgacık dönüşümü tercih edilmiştir. Dalgacık dönüşümü matematiksel bir fonksiyon olup uygulamalı matematik, sinyal, ses ve görüntü işleme başta olmak üzere birçok farklı alana uygulanabilen bir yöntemdir. Dalgacık dönüşümü ile bir sinyalin zaman-frekans ifadesi elde edilerek durağan olmayan sinyallerin analiziyle birlikte Fourier dönüşümünün eksik yanları ortadan kaldırılmaktadır [16]. Dalgacık dönüşümünün en önemli üstünlüğü, düşük frekanslar için geniş, yüksek frekanslar için dar olacak şekilde değişen pencere boyutlarının olmasıdır. Bu sebeple, bütün frekans aralıklarında en uygun zaman-frekans çözünürlüğü elde edilebilmektedir [17]. Dalgacık dönüşümü farklı frekanslarda farklı çözünürlüklerin elde edilmesini sağlayan çoklu çözünürlük tekniklerini kullandığından dalgacık algoritmaları veriyi farklı ölçeklerle ve

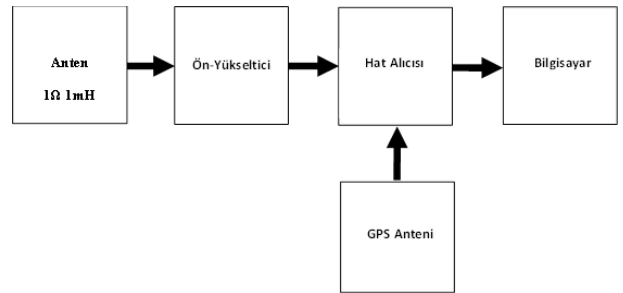
çözünürlüklerle işlerler. Dalgacık seçimi ve dağılım seviyelerinin sayısının tespiti, işaretlerin dalgacık dönüşümü ile analizinde çok önemlidir [18,19].

Bu çalışmada, farklı iki verici istasyondan alınan 2006 yılının ilk altı ayına ait VLF sinyallerinde oluşan tedirginlikleri manuel ve otomatik olarak tespit eden bir program geliştirilmeye çalışılmış ve sonuçları değerlendirilmiştir. Bu amaçla, ikinci bölümde VLF alıcı sistemi, dalgacık dönüşümü ve istatistiksel kuramlar ifade edilmiş üçüncü bölümde VLF sinyallerinde oluşan tedirginlikleri otomatik olarak tespit eden yazılım ve dördüncü bölümde ise bu yazılım ile manuel inceleme sonuçları karşılaştırılmıştır.

2. Materyal ve Metot

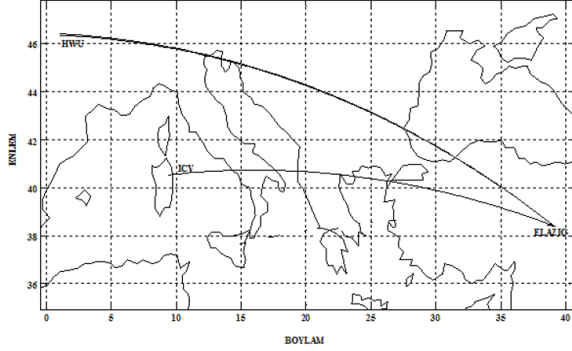
2.1. VLF alıcı sistemi

VLF alıcı sistemi Fırat Üniversitesi Fen Fakültesinde (38.40° N; 39.12° E) TÜBİTAK104E-005 destekli proje ile kurulmuştur. VLF Alıcı Sistemi sırasıyla; Anten, Ön Yükseltici (pre-amplifier), Hat Alıcısı (Line Receiver), Küresel Konum Sistemi (GPS) Anteni ve bilgisayardan oluşmaktadır. Antende elektromanyetik alan değişimlerinden oluşan elektriksel sinyaller ön yükseltici ile yükseltilerek hat alıcısına gönderilir. Hat alıcısı, sinyali filtreler ve veriyi GPS zaman sinyaliyle senkronize bir şekilde işleyerek bilgisayara gönderilir. Bilgisayardaki yazılım kullanılarak sinyal ve zaman kaydedilir [20]. VLF alıcı sisteminin çalışma prensibini gösteren blok diyagramı Şekil 1’de verilmiştir.



Şekil 1. VLF alıcı sistemi blok diyagramı [11].

Şekil 2’de bu çalışmada kullanılan VLF verici istasyonları ile alıcı istasyonun yerleri harita üzerinde gösterilmiştir. Bu iki sinyalin frekansları, çağrı kodları yerleşim yerleri ve alıcıya olan uzaklıkları da Tablo 1’de verilmiştir.



Şekil 2. VLF vericileri ve alıcısının harita üzerinde gösterimi.

Tablo 1. Verici ile alıcı istasyonun frekans, çağrı kodu, yerleşim yerleri ve aradaki mesafeler

Frekans (Hz)	Çağrı Kodu	Yerleşim	Mesafe (km)
18300	HWU	Le Blanc, Fransa (46° 37' D, 1° 05' K)	3220
20270	ICV	Sardegna, İtalya (40° 55' D, 9° 45' K)	2550
Alıcı	FF	Elazığ, Türkiye (38°40' D, 39° 12' K)	-----

2.2. Dalgacık dönüşümü

Dalgacık dönüşümü, sinyallerin ve görüntülerin farklı çözünürlük ve ölçeklerde tanımlanmasını sağlayan oldukça kuvvetli bir dönüşüm algoritmasıdır. Herhangi bir fonksiyonun dalgacık dönüşümü Denklem (1)’de verildiği gibi elde edilir[11].

$$WT(a, b) = \langle f(x) \Psi_{a,b}(x) \rangle = |a|^{-\frac{1}{2}} \int_{-\infty}^{\infty} \Psi\left(\frac{x-b}{a}\right) dx \quad (1)$$

Burada, $\Psi_{a,b} = |a|^{-\frac{1}{2}} \Psi\left(\frac{x-b}{a}\right)$ ana dalgacık fonksiyonu olarak adlandırılan, $\Psi(x)$, dalgacık fonksiyonu olup a ölçek, b kaydırma faktörü ve “ Ψ ” ise karmaşık eşlenik işlevini

tanımlamaktadır. Ayrıca Denklem (2)’de verilen kabul edilebilirlik şartının da sağlanması gerekir.

$$\int_{-\infty}^{\infty} \Psi(x) dx = 0 \quad (2)$$

2.3. İstatiksel kuramlar

Bilimsel araştırmaların amaçlarından birisi de üzerinde çalışılan değişkenin diğer değişkenlerle olan ilişkisini ve bu değişken üzerinde etkili olan faktörleri belirleyebilmektir. Sayılarla ilgili bilgilerin özetlenmesi ve verilerin tanımlanması için istatistik bilimi kullanılır. Bir veri grubunu ifade etmek için bir yerleşim ve bir de değişim ölçütü tanımlamak gereklidir. Yerleşim ölçüsü verilerin almak istediği değerleri gösterirken değişim ölçüsü bu yerleşim etrafındaki dağılımı gösterir[21]. Genellikle kullanılan merkezi yerleşim aritmetik ortalama olup bunun yanında değişim olarak standart sapma ve standart hata verilir. Standart sapma bir veri grubundaki her bir verinin ortalamaya göre ne kadar uzaklıkta olduğunu söyler. Standart hata ise bir veri grubunda seçilecek aynı büyüklükteki örneklemelerin ortalamalarının yayılma ölçütüdür [22]. Aritmetik ortalama, standart sapma ve standart hata formülleri Denklem (3), (4) ve (5) de sırasıyla verilmiştir.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (3)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (4)$$

$$\text{Standart Hata} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (5)$$

3. Sonuçlar

VLF vericilerinden gelen sinyaller her gün alıcı tarafından 13:05 UT’den başlayıp ertesi gün saat 06:05 UT’ye kadar 17 saat süreyle kayıt yapılmaktadır. VLF sinyallerinde oluşan tedirginlikleri sağlıklı bir şekilde tanımlamak için genellikle sinyaller manuel olarak yani gözle bakılarak tespit edilmektedir. Bir sinyalin bir günlük değişimini incelemek demek 17 saatlik bir sinyal değişimini sinyali uygun yazılımlar ile büyültüp küçültürerek o sinyal üzerinde yorumlar yaparak anlamlı veriler çıkartmak demektir.

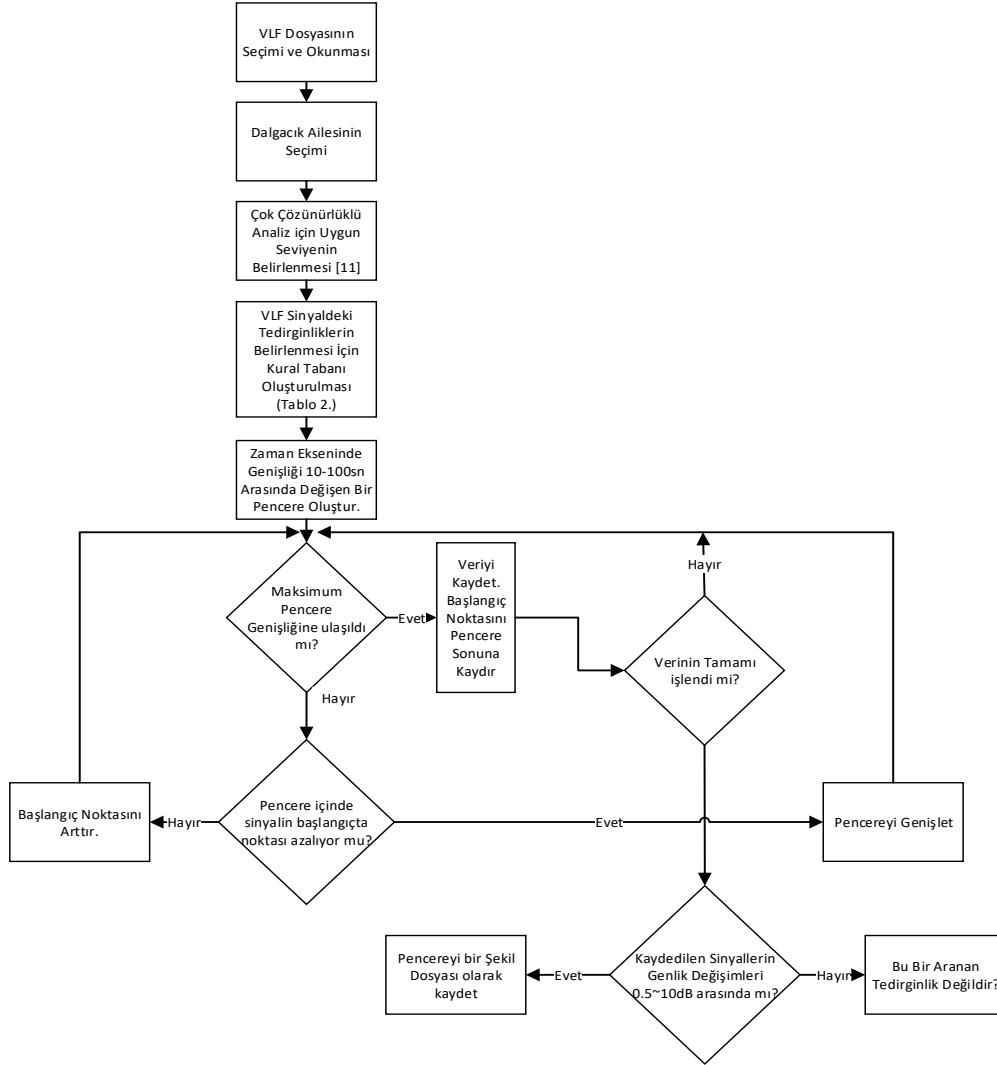
VLF sinyallerinde oluşan tedirginliklerin temel sebepleri genelde E/F ve LEP olaylarıdır. Bu olaylar geçici karakteristikleri tarafından tanımlanır. Bunlar, oluşum süresi, oluşum şiddetindeki değişim miktarı ve geri dönüş zamanıdır. Karakteristiklerin azami ve asgari değerleri Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2’de bahsedilen karakteristiklere ait temel özellikleri dikkate alan ve MATLAB ortamında geliştirilen bir program ile sinyaldeki tedirginlikler tespit edilmiş ve tespit edilen olayların olduğu sinyal bölgesi sinyalden ayrılıp

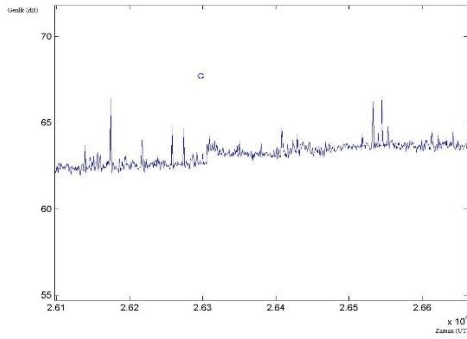
büyütülerek bir klasörde toplanmış ve kullanıcının yorumuna bırakılmıştır. Bu programa ait akış şeması Şekil 3’te ve her iki tedirginliğe ait örnek çıktılar Şekil 4’te verilmiştir.

Tablo 2. VLF sinyalinde oluşan tedirginliklerin karakteristikleri ve değişim aralıkları

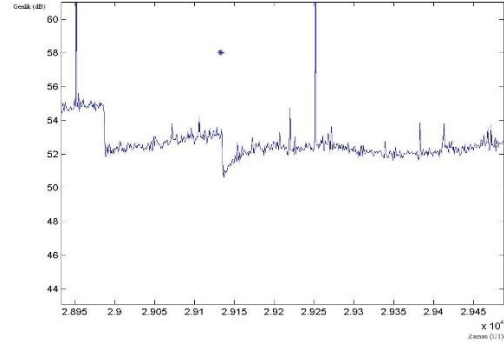
Olay Karakteristikleri	Değişim Aralıkları
Oluşum Süresi	$0.5 \text{ sn} \leq t_d \leq 5 \text{ sn}$
Oluşum Şiddetindeki Değişim Miktarı	$0.5 \text{ dB} \leq \Delta A \leq 10 \text{ dB}$
Geri Dönüş Zamanı	$10 \text{ sn} \leq t_r \leq 100 \text{ sn}$



Şekil 3. Program akış şeması.



(a)



(b)

Şekil 4. (a) HWU verici istasyonuna ait 12.05.2006 tarihli otomatik tespit edilen VLF sinyal tedirginliği. **(b)** ICV verici istasyonuna ait 01.03.2006 tarihli VLF sinyal tedirginliği.

İnceleme yapılan dönem için program test edilmiş ve elde edilen sonuçlar manuel (gözle) olarak yapılan gözlem sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Bu sonuçlar Tablo 3’de verilmiştir.

Tablo 3. Her iki istasyon için hem program hem de manuel olarak tespit edilen olay sayısı

AYLAR	PROGRAM		MANUEL	
	HWU	ICV	HWU	ICV
OCAK	132	28	128	20
ŞUBAT	110	78	71	107
MART	17	74	10	86
NİSAN	45	35	31	21
MAYIS	30	37	19	23
HAZİRAN	37	15	35	9

4. Tartışma

İstatiksel olarak gruplar birbirleri ile karşılaştırılacak olursa ortalama $\pm$ standart hata değerleri kullanılır. Ortalama ± 1 (standart hata) ortalama değerin %68 olasılıkla “ ± 1 (standart hata)” kadar sağa-sola yayıldığını gösterir. Ortalama ± 2 (standart hata) %95 olasılığı ve Ortalama ± 3 (standart hata) ise %99 olasılığı temsil eder. Tablo 4’teki değerler incelenecek olursa her iki istasyon içinde hem program hem de manuel hesaplamalarda güven aralıklarının aynı sayı doğrusu üzerinde birbirlerini kestikleri tespit edilmiştir. Dolayısıyla olay sayısı değerleri birbirlerinden istatistiksel olarak farklı değildir. Sonuç olarak her iki grubun da ortalamaları

birbirinden farklı değildir ve gruplar arasında fark yoktur denilebilir.

Tablo 4. İki grup arasındaki istatistiksel analiz sonuçları

	PROGRAM		MANUEL	
	HWU	ICV	HWU	ICV
Ortalama	61.83	44.5	49	44.3
Standart sap.	43.14	23.38	40.13	37.65
Standart hata	117.6	9.54	16.38	15.36
Ort ± 1 (S. H.)	44.23	34.96	32.62	28.97
	79.43	54.04	65.38	59.69

Yapılan bu hesaplamalar ışığında, gerçekleştirilen bu yazılım sayesinde yaklaşık 8 saat süren ve gözle inceleme sonucunda arada kalan bazı tedirginliklerin dikkate alınmaması gibi problemler aşılacak özellikle süre bakımından 1 saat gibi oldukça düşük zamanlara ulaşılmıştır. Bu analizlerin hızlı yapılabilmesi VLF sinyalleri ile depremler arasındaki ilişkinin incelenmesi ve Türkiye üzerinde oluşan yıldırımların tespiti gibi birçok çalışmaya hız kazandıracaktır.

5. Kaynaklar

1. Wait, J.R. (1964). The relation between VLF propagation and D-layer characteristics, *I.E.E.E. Transactions on Antennas and Propagation*, **12(2)**: 239-240.
2. Cummer, S.A., Inan, U.S. and Bell, T.F. (1998). Ionospheric D region remote sensing using VLF radio atmospherics. *Radio Science*, **33**: 1781-1792.
3. Cummer, S.A., Bell, T.F., Inan, U.S. and Chenette, D.L. (1997). VLF remote sensing of high energy

auroral particle precipitation. *J. Geophys. Research*, **102**: 7477–7484.

4. Inan, U.S., Lehtinen N.G., Lev-Tov S.J., Johnson M.P., Bell, T.F. and Hurley K. (1999). Ionization of lower ionosphere by gamma rays from a magnetar: Detection of a low energy (3-10 keV) component. *Geophysical Research Letters*, **26**: 3357-3360.

5. Yaşar, M. (2012). VLF sinyallerinde oluşan tedirginlikler ile jeomanyetik indeksler arasındaki ilişkinin incelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*.

6. Johnson, M.P. (2000). VLF Imaging of lightning-induced ionospheric disturbances, *Phd Thesis, Stanford University, Stanford*.

7. Cummer, S.A. (1997). Lightning and ionospheric remote sensing using VLF/ELF radio atmospherics, *Phd Thesis, Stanford University, Stanford*.

8. Inan, U.S., Bell, T.F. and Rodriguez, J.V. (1991). Heating and ionization of the lower ionosphere by lightning. *Geophysical Research Letters*, **18**: 705-708.

10. Inan, U. S., Schafer, D. C., Yip, W. Y. and Orville, R. E. (1988). Subionospheric VLF signatures of nighttime D region perturbations in the vicinity of lightning discharges. *J. Geophysical Research*, **93**: 11455–11472.

11. Canıılmaz, M., Türk, M. and Güzel, E. (2016). Uzaktan algılanan düşük frekanslı sinyallerin gürültülerinin giderilmesinde dalgacık dönüşümü ailelerinin performanslarının incelenmesi ve karşılaştırılması, *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, **28(1)**: 73-77.

12. Inan, U.S., Pasko, V.P. and Bell, T.F. (1996). Sustained heating of the ionosphere above thunderstorms as evidenced by early/fast VLF events. *Geophysical Research Letters*, **23**: 1067-1070.

13. Taranenko, Y.N., Inan, U.S. and Bell, T.F. (1993). Interaction with lower ionosphere of electromagnetic pulses from lightning: Excitation of optical emissions. *Geophysical Research Letters*, **20**: 2675-2678.

14. Atıcı, R., Güzel, E., Canıılmaz, M. and Sagır, S. (2016). The effect of lightning-induced electromagnetic waves on the electron temperatures in the lower ionosphere. *Kuwait Journal of Science*, **43(4)**: 143-149.

15. Canıılmaz, M., Güzel, E., Yeşil, A. and Ünal, İ. (2005). VLF Perturbations due to Lightning over Elazığ. *Balkan Physics Letters*, **13(2)**: 65–71.

16. Güzel, E., Canıılmaz, M. and Türk, M. (2011). Application of wavelet-based denoising techniques to remote sensing very low frequency signals. *Radio Science*, **46**: 1-9.

17. Gür, D., Türk, M., Canıılmaz, M. and Güzel, E. (2013). Uzaktan algılanan VLF sinyallerindeki düzensizliklerin giderilmesi için tasarlanan arabirim ile farklı dalgacık ailelerinin ve ayrıştırma seviyelerinin karşılaştırılması. *Otomatik Kontrol Ulusal Kongresi, Bildirileri (26-28 Eylül)*, Malatya, 1215-1218.

18. Daubechies, I. (1990). The wavelet transform, time-frequency localization and signal analysis. *IEEE Transactions on Information Theory*, **36(5)**: 961-1005.

19. Mallat, S. (1989). A theory for multiresolution signal decomposition: The wavelet representation. *I.E.E.-Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, **11(7)**: 674-693.

20. Cohen, M. (2004). 2005 VLF Receiver Documentation” *Star Laboratory VLF Group, Stanford University*.

21. Özbek, H. and Keskin, S. (2007). Standart Sapma mı Yoksa Standart Hata mı? *Van Tıp Dergisi*, **14(2)**: 64-67.

22. Sümbüloğlu, K. and Sümbüloğlu V. (2002). *Biyoistatistik. 10. Baskı, Hatiboğlu Yayınları*, Ankara.

Bor İlavesinin Toz Metal D2 Takım Çeliğinin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerine Etkisi

Özgür ÖZGÜN^{1*}, Ali ERÇETİN¹, Zülküf BALALAN¹, H. Özkan GÜLSOY², Mahir UZUN¹

¹Bingöl Üniversitesi Müh. Mim. Fak. Mak. Müh. Böl., 12000 Bingöl/TÜRKİYE

²Marmara Üniversitesi Teknoloji Fak. Metalurji ve Malz. Müh. Böl., 34722 İstanbul/TÜRKİYE

*oozgun@bingol.edu.tr; ozgrozgun@gmail.com

(Geliş/Received: 24.02.2017; Kabul/Accepted: 10.05.2017)

Özet

Bu çalışmada, toz metalurjisi (T/M) yöntemi ile üretilen D2 takım çeliğinin mikroyapı ve mekanik özelliklerine B ilavesinin etkileri incelenmiştir. D2 takım çeliği tozunun içerisine ağırlıkça %0,5-2 arasında farklı oranlarda amorf B ilavesi yapılarak elde edilen toz karışımları 700 MPa basınç uygulanarak şekillendirilmiştir. Bor ilavesinin sinterleme davranışına etkisini tespit etmek amacıyla şekillendirilen ham numuneler farklı sıcaklıklarda sinterlenmiştir. En yüksek yoğunlaşmayı sağlayan sinterleme parametrelerini tespit etmek amacıyla yoğunluk ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Optimum şartlarda sinterlenen numunelerin mikroyapı ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Mikroyapı incelemeleri X-ışınları analizi (XRD), taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve enerji dağılımı spektrometresi (EDS) ile gerçekleştirilmiştir. Mekanik özelliklerin belirlenmesinde sertlik ölçümlerinden yararlanılmıştır. Sonuçlar, belirli bir orana kadar B ilavesinin, daha düşük sinterleme sıcaklıklarında daha yüksek bağıl yoğunluk değerleri sağladığını göstermiştir. XRD analizleri ve SEM incelemeleri, B oranındaki artışın $M_{23}C_6$ tipi karbürlerin $M_{23}(C,B)_6$ boro-karbürlere dönüşmesine yol açtığını göstermiştir. B oranındaki artışla birlikte üretilen çelik malzemelerin sertlik değerlerinde artış olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: D2 takım çeliği, Bor ilavesi, Yoğunluk, Mikroyapı, Sertlik.

The Effect of Boron Addition on the Microstructure and Mechanical Properties of Powder Metal D2 Tool Steel

Abstract

In this study, the effects of boron addition on the microstructure and mechanical properties of D2 tool steel produced via powder metallurgy (P/M) method was examined. The powder mixtures obtained by adding different rates of B in weight percentage between 0.5-2 into the D2 tool steel powder were shaped with applying 700 MPa pressure. In order to determine effect of B addition on sintering behavior, the green samples were sintered at various temperatures. Density measurements were conducted to determine the sintering parameters provide the highest densification. The microstructure and mechanical properties of samples sintered at optimum conditions were investigated. Microstructural examinations were carried out by scanning electron microscope (SEM), energy dispersive spectrometry (EDS) and X-ray diffraction analysis (XRD). Hardness measurements were used in mechanical characterization. The results have shown that B addition up to a certain rate provides higher relative density values at lower sintering temperatures. XRD analyses and SEM examinations showed that increasing of B rate leads to transformation of $M_{23}C_6$ type carbides to $M_{23}(C,B)_6$ boro-carbides. It is determined that the hardness values of produced steels increased with increasing of B rate.

Keywords: D2 tool steel, Boron addition, Density, Microstructure, Hardness.

1. Giriş

Takım çelikleri metal şekillendirme ve kesme işlemlerinin yapıldığı şartlardaki aşındırıcı etkenlere dayanacak malzemeler olarak geliştirilmişlerdir. Takım çeliklerini soğuk iş, şok dirençli, sıcak iş, yüksek hız, kalıp ve özel

amaçlı takım çelikleri olmak üzere 6 ana gruba ayırmak mümkündür [1]. Bunlar arasında yüksek aşınma direnci ve düşük maliyetin ihtiyaç duyulduğu takım ve kalıpların birçok türü için kullanılan soğuk iş takım çelikleri en önemli grubu oluştururlar [2,3]. D2 soğuk iş takım çelikleri yüksek miktarda karbon ve krom içeren

çelikler olup, çeşitli metal işleme ve üretim işlemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Zımbalar, delme ve kesme kalıpları, bükme takımları, çeşitli kesiciler ve ağaç işleme takımları D2 takım çeliklerinin tipik endüstriyel uygulamalarına örnek olarak gösterilebilir [4]. D2 takım çeliklerinin yaygın olarak kullanılmalarında en önemli etken yüksek Cr ve C içerikleri sayesinde mikroyapılarında mükemmel aşınma direnci ve yüksek mukavemet özelliklerini sağlayan krom karbürlerin bulunmasıdır [4-6].

D2 takım çelikleri geleneksel döküm yöntemi ile üretilirken Cr ve C gibi alaşım elementleri katılaşma sırasında ciddi segregasyona yol açarlar. Bu yüzden döküm yöntemi ile üretilmiş D2 takım çeliğinin mikroyapısında dendrit sınırları boyunca ağ şeklinde ötektik karbürler oluşur ve bu ağ şeklindeki karbürler kırılma tokluğunu önemli ölçüde düşürürler [7,8]. Özellikle katılaşmanın son aşamasında oluşan ötektik yapıdaki krom karbür ağından dolayı başka bir üretim sürecinden geçmeyecek son ürünlerin döküm yöntemi ile üretilmeleri kabul edilebilir değildir [9]. Dökümle bu tür malzemelerden sıcak şekillendirme işlemleri ile parça üretiminde kullanılacak olan ingotlar üretilmektedir. Ancak ingot içerisinde döküm esnasında oluşan bu karbürlerin takip eden sıcak şekillendirme işlemleri ile parçalanmaları zor olmakla birlikte [10,11], sıcak deformasyon işlemleri esnasında krom karbür ağları derin çatlakların oluşmasına da yol açabilmektedir [7].

Yüksek alaşımlı çeliklerin üretiminde karşılaşılan bu tür sorunları aşmak için geleneksel döküm yöntemlerinin yerine günümüzde T/M gibi modern üretim teknikleri kullanılmaktadır. T/M tekniklerinin kullanılması ile geleneksel döküm yöntemlerine nazaran ince ve homojen dağılmış karbürler elde edilebilmektedir [12,13]. T/M, metal veya seramik tozlarının üretimini ve bu tozlardan bir dizi işlem ile çeşitli parçaların elde edilmesini sağlayan bir üretim yöntemidir. Geleneksel T/M, metal tozlarının karıştırılmasını, karışım tozların bir kalıp içerisinde basınç ile sıkıştırılarak şekillendirilmesini ve şekillendirilmiş ham parçaların farklı atmosferler altında sinterlenmesini içermektedir. Ancak geleneksel

yöntemlerle sinterlenmiş T/M parçalar genellikle hacimsel olarak %5'in üzerinde gözenek içerirler [14]. Soğuk iş takım çeliklerinin T/M ile üretiminde gözenek sorununun üstesinden gelinebilmesi için sıcak izostatik presleme (HIP) yöntemi kullanılmaktadır. Ancak bu yöntem oldukça pahalıdır [15]. Toz metalürjisinde, demir esaslı malzemelerden sadece geleneksel yöntemle (presleme ve sinterleme) yüksek yoğunluklu parçalar elde etmeyi amaçlayan çok sayıda çalışma yapılmıştır [14,16-21]. Bu çalışmalarda geliştirilmiş sinterleme olarak anılan [14,19] ve sinterleme davranışlarının modifikasyonunu kapsayan bir yol izlenmiştir. Bor, sahip olduğu özellikler sayesinde demir esaslı malzemeler için ideal bir sinterleme geliştirici elementtir [22,23].

Bor ve demirin oluşturduğu denge sisteminde, borun demir içerisindeki çözünürlüğü yok denecek kadar az iken demirin bor içerisindeki çözünürlüğü yüksektir [19]. Demir tozu içerisinde bor bulunması durumunda 1165-1175 °C'nin üzerinde gerçekleştirilen sinterleme işlemlerinde yoğunlaşmayı, mekanik özellikleri ve aşınma direncini arttıran bir sıvı faz oluşur [14]. Artan B ilavesi ile birlikte daha yüksek miktarda ötektik sıvı oluşması ve buna bağlı olarak daha yüksek sinterleme yoğunlukları, küresel morfolojili gözenekler ve daha üstün mekanik özellikler elde edilmesi beklenir [19]. Sağladığı bu avantajlardan dolayı B, paslanmaz çelikler de dahil olmak üzere farklı demir esaslı alaşım sistemlerine sinterleme geliştirici olarak element tozu veya ferrobör olarak %0,01-1,2 aralığında ilave edilmektedir [24].

Bu çalışmada, T/M yöntemi ile üretilen D2 takım çeliğinin mikroyapı ve mekanik özelliklerine bor ilavesinin etkileri incelenmiştir. Bor ilavesinin amacı, sinterleme esnasında sıvı faz oluşumunu ve bu sayede daha düşük sinterleme sıcaklıkları ile daha yüksek yoğunluğa sahip parçalar elde edilmesini sağlamaktır. Çalışmada D2 takım çeliği tozu içerisine farklı oranlarda amorf bor tozu ilave edilip farklı sinterleme parametreleri kullanılarak malzeme üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretilen numunelere uygulanan yoğunluk ölçümleri ile optimum sinterleme parametreleri tespit edilmiştir. Optimum şartlarda üretilen

numunelerin XRD, SEM ve SEM/EDS analizleri ile mikroyapı özellikleri karakterize edilmiştir. Mekanik özelliklerin belirlenmesinde mikrosertlik ölçümlerinden yararlanılmıştır.

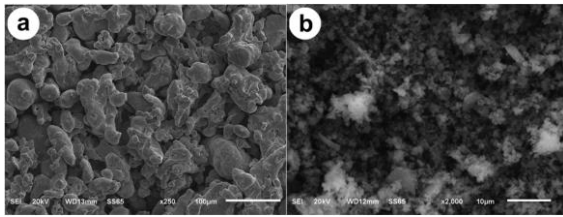
2. Malzeme ve Metot

2.1. Malzeme

Deneyisel çalışmalarda Powdrex firmasından temin edilmiş ve partikül boyutu 45–100 μm aralığında olan su atomizasyonu ile üretilmiş D2 takım çeliği tozu kullanılmıştır. D2 takım çeliği tozunun kimyasal bileşimi Tablo 1’de verilmiştir. D2 takım çeliği içerisine Sigma Aldrich firmasından temin edilen amorf B tozu ilave edilmiştir. Bu tozun saflığı %95’in üzerinde olup, partikül boyutu 1 μm ’den küçüktür. Şekil 1’de D2 takım çeliği tozunun ve B tozunun SEM görüntüleri verilmiştir.

Tablo 1. Çalışmada kullanılan D2 takım çeliği tozunun kimyasal bileşimi

C	Cr	Mo	V	W	Mn	Ni
1,5	11,71	1,09	0,83	0,34	0,28	0,08
Cu	Co	P	S	Si	Fe	
0,03	0,02	0,037	0,007	0,27	Kalan	



Şekil 1. Çalışmalarda kullanılan; a) D2 takım çeliği tozunun, b) Bor tozunun SEM görüntüleri

2.2. Metot

D2 takım çeliği içerisine ağırlıkça %0,5, %1, %1,5 ve %2 olmak üzere 4 farklı oranda amorf bor tozu ilavesi yapılmıştır. Tozlar turbula karıştırıcıda çelik bilya ilave edilerek fiziksel olarak 24 saat süre ile karıştırılmıştır. Karışım tozlardan 700 MPa basınç uygulanarak 13 mm çapında silindirik numuneler şekillendirilmiştir. Preslenen numuneler Ar gazı atmosferinde 1150–1200 $^{\circ}\text{C}$ sıcaklık aralığında 1 saat bekletme süresi ile sinterlenmiştir. Sinterleme işlemleri MTI marka tüp fırında alümina altlık kullanılarak 10 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ısıtma ve soğutma hızı ile

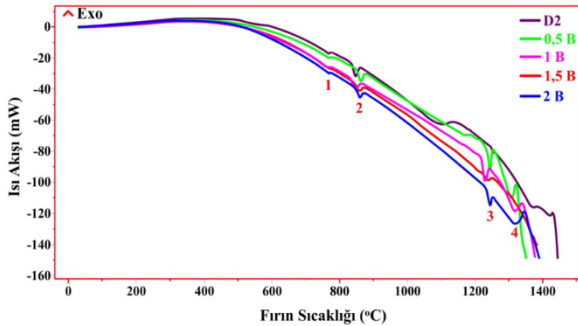
yapılmıştır. Sinterlenen numunelerin yoğunluğu Arşimet prensibine göre yoğunluk ölçüm kitine sahip Redwag marka hassas teraziyle gerçekleştirilmiştir. XRD analizi Rigaku Ultima IV X-Ray Difractometer cihazında Cu X-ışını tüpü ($\lambda=1,5405$) kullanılarak 0,02/0,4 derece/saniye tarama hızı ile gerçekleştirilmiştir. Mikroyapı incelemeleri için metalografik numune hazırlama aşamalarından geçirilen numuneler %3 nital çözeltisi ile dağlanmış. SEM ve SEM/EDS incelemeleri JEOL JSM 6510 taramalı elektron mikroskobu ve bu cihaza bağlı IXRF 550 marka EDS sistemi ile gerçekleştirilmiştir. Sertlik ölçümleri Vickers yöntemi ile Emco-test marka Durascan 20 model sertlik ölçüm cihazında 500 g yük uygulanarak yapılmıştır.

3. Bulgular ve Tartışma

Şekil 2’de faz dönüşümlerine B ilavesinin etkisini belirlemek amacıyla D2 takım çeliği tozuna ve B ilavesi yapılmış karışım tozlarına yapılan DSC analizlerine ait eğriler verilmiştir. DSC analizleri Setaram Labsyseo marka cihazda sıkıştırılmamış tozların 10 $^{\circ}\text{C}/\text{dk}$ ısıtma hızı ile 1400 $^{\circ}\text{C}$ ’ye kadar ısıtılması şeklinde Ar atmosferinde gerçekleştirilmiştir. Bombac ve arkadaşları [25] tarafından D2 takım çeliğinde termomekanik işlemlerin fazlara etkisini belirlemek için yapılan bir çalışmada DTA analizi yapılarak faz dönüşümleri tespit edilmiştir. Söz konusu çalışmaya göre 800 $^{\circ}\text{C}$ ’nin hemen altında M_{23}C_6 tipi karbürlerin M_7C_3 tipi karbürlere dönüştüğünü gösteren endotermik bir pik belirtilmiştir. Şimdiki çalışmada, 760 $^{\circ}\text{C}$ civarında 1 numara ile gösterilen endotermik pikin su atomizasyonu ile üretilmiş olan D2 takım çeliği tozunda bulunan karbürlerin dönüşümü ile ilgili olduğu söylenebilir. B ilavesinin bu faz dönüşümünün sıcaklığı üzerine önemli bir etkisinin bulunmadığı görülmektedir. Muro ve arkadaşları [11] ve Valloton ve arkadaşları [26] tarafından yapılan çalışmalarda verilmiş olan D2 takım çeliğine ait faz diyagramları göz önünde bulundurulduğunda DSC eğrilerinde 2 numara ile gösterilen endotermik pikin martenzit/ferrit fazlarının ostenite dönüşümünü gösterdiği anlaşılmaktadır. Bombac ve arkadaşları [25]

tarafından yapılan çalışmada DTA analizine göre martenzit/ferrit fazlarının ostenite dönüşümünün 838 °C’de gerçekleştiği bildirilmektedir. Şimdiki çalışmada D2 takım çeliğine ait tozda bu dönüşüm 839 °C’de gerçekleşmiştir. B ilavesi yapılmış tozlarda bu dönüşüm gecikmekte ve yaklaşık 850 °C civarlarında gerçekleşmektedir.

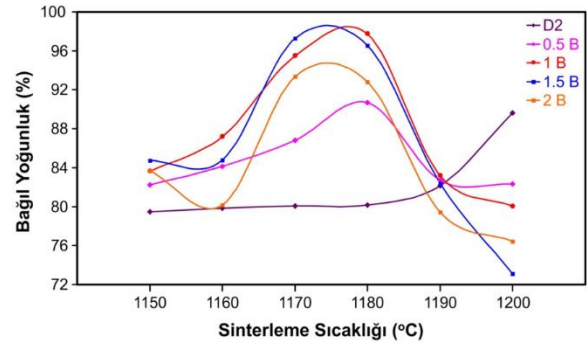
Eğriler incelendiğinde bor ilavesinin sıvı faz oluşum sıcaklığını düşürdüğü anlaşılmaktadır. Bombac ve arkadaşları [25], Termo Calc programı ile belirledikleri dengeye göre D2 takım çeliğinin katılaşması sırasında 1392 °C’de ostenit tanelerinin sıvıdan oluşmaya başladığını ve 1242 °C’de ostenit tane sınırlarında M_7C_3 tipi karbürlerin oluştuğunu belirtmişlerdir. Şimdiki çalışmada DSC analizine ait eğrilerde 3 numara ile gösterilen endotermik piklerin de M_7C_3 tipi karbürlerin çözünme sıcaklığına işaret ettiği düşünülmektedir. 3 numaralı pikler incelendiğinde B ilavesi yapılmamış D2 takım çeliğinde M_7C_3 tipi karbürlerin 1250 °C’de çözündüğü görülmektedir. B ilavesi yapılan toz karışımlarında M_7C_3 tipi karbürlerin çözünme sıcaklığında belirgin düşüş olduğu görülmektedir. %1 B içeriğine sahip tozda dönüşüm 1232 °C’de olmuştur. Şekil 2’deki DSC eğrilerinde 4 numara ile gösterilen pik ergimenin tamamlanma sıcaklığını göstermektedir. Bu piklere göre başlangıç tozunda ergime 1365 °C’de tamamlanırken B ilave edilen numunelerde bu sıcaklığın 1301 °C’ye kadar düştüğü görülmektedir. D2 tozunda likidüs sıcaklığının Bombac ve arkadaşları [25] tarafından verilen ve 1392 °C olan likidüs sıcaklığından daha düşük olması malzemelerin fiziksel özelliklerine bağlanmaktadır.



Şekil 2. Farklı oranlarda bor ilavesi yapılmış D2 takım çeliği tozlarının DSC analizlerinden elde edilen eğrileri

Özgün ve arkadaşları tarafından yapılan önceki çalışmalarda da toz formundaki malzemelerin sahip oldukları yüksek yüzey enerjisi sayesinde bulk malzemelere göre daha düşük sıcaklıklarda ergidikleri belirtilmiştir [27,28]. Ergime sıcaklıkları arasındaki farklılıkta malzemelerin kimyasal bileşimlerindeki farklılıkların da etkili olduğu düşünülmektedir.

Şekil 3’te farklı sıcaklıklarda sinterlenen numunelerin bağıl yoğunluk değerleri verilmiştir. Şimdiki çalışmada D2 takım çeliğinin teorik yoğunluğu 7,459 g.cm⁻³ olarak hesaplanmıştır.



Şekil 3. Sinterleme sıcaklığına ve B oranına bağlı olarak bağıl yoğunluk değerlerinin değişimi

Bor ilavesi yapılmamış D2 tozundan üretilen numunede bağıl yoğunluğun sinterleme sıcaklığındaki artışla birlikte arttığı görülmektedir. Bor içermeyen D2 tozundan şekillendirilen numuneler için 1150-1200 °C aralığında gerçekleştirilen sinterleme işlemlerinden en yüksek bağıl yoğunluk değerini sağlayan sıcaklık 1200 °C olmuştur. Bu sıcaklıkta ulaşılan bağıl yoğunluk değeri ortalama %89,63 olmuştur. Muro ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada [11] aynı toz kullanılarak N₂ atmosferinde D2 takım çeliği içerisine B ilavesi ile daha düşük sıcaklıklarda daha yüksek bağıl yoğunluk değerlerine ulaşılmıştır. Bor sinterleme esnasında sıvı faz oluşmasını sağlayıcı ve toz metal çeliklerin yoğunluğunu artırıcı element olarak bilinmektedir [19]. Borun demir içerisindeki çözünürlüğü oldukça düşük (ağırlıkça %0,002) olmasına rağmen 1174-1177 °C’de sıvı faz oluşturmada [19,29,30] ve Fe-Fe₂B ötektiği sayesinde kütle transferi gerçekleştirmektedir [30]. Borun sağladığı bu avantajdan yararlanılan

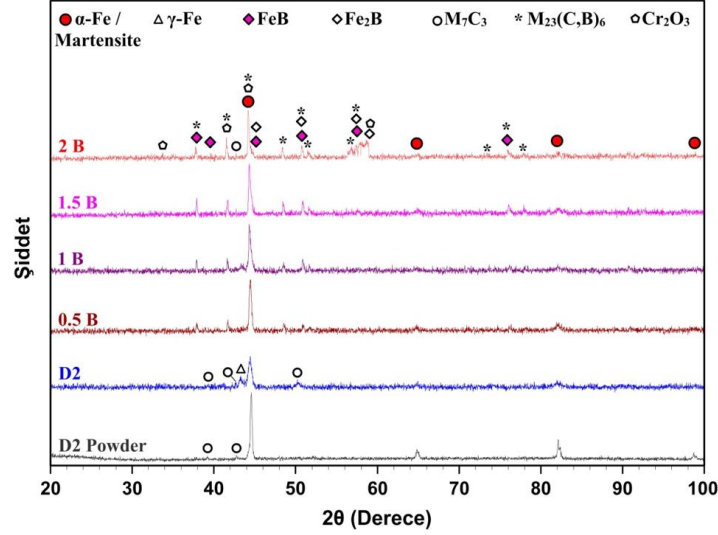
farklı çeliklerin sinterlenerek üretilmesi üzerine gerçekleştirilen birçok çalışmada artan B ilavesinin sinter yoğunluğunu arttırdığı bildirilmektedir [14,16-19]. Şimdiki çalışmada B ilave edilmiş numunelerde sinterleme sıcaklığının yoğunlaşmaya etkisi ötektik reaksiyon sıcaklığının altında farklı, üstünde farklı olmuştur. Ötektik reaksiyon sıcaklığına kadar sinterleme sıcaklığındaki artış yoğunlaşmayı olumlu etkilerken ötektik reaksiyon sıcaklığı aşıldıktan sonra sinterleme sıcaklığındaki artışın yoğunlaşmayı olumsuz etkilediği görülmüştür. En yüksek bağıl yoğunluk değerleri ötektik reaksiyon sıcaklığına yakın sinterleme sıcaklıklarında elde edilmiştir. Bor ilave edilmiş malzemelerin çıkabilecekleri maksimum yoğunluklar, ilave edilen B miktarına bağlı olarak değişim göstermiştir. B miktarı arttıkça, numunelerin ulaşabilecekleri maksimum bağıl yoğunluk değerine daha düşük sıcaklıklarda ulaştıkları görülmektedir. Ancak en yüksek bağıl yoğunluk değerine en yüksek bor oranına sahip numunede değil, ağırlıkça %1 B içeren numunede ulaşılmıştır. %1 B içeren numunede 1180 °C’de gerçekleştirilen sinterleme işlemi ile ulaşılan en yüksek bağıl yoğunluk değeri %97,76 olmuştur. Burada dikkat çeken bir detay, ağırlıkça %0,5 ve %1 B içeren numuneler, ulaşabilecekleri maksimum yoğunluk değerine 1180 °C’de ulaşırlarken %1,5 ve %2 B içeren numunelerin en yüksek bağıl yoğunluğa 1170 °C’de ulaşmalarıdır. Buradan B miktarındaki artışın, kimyasal kompozisyona bağlı olarak ulaşılabilir maksimum yoğunluk değerine daha düşük sıcaklıkta ulaşılmasını sağladığı söylenebilir. B miktarının %1,5’i aşması ulaşılabilen bağıl yoğunluk değerini düşürmüştür. Özellikle %2 B içeren numuneye ait eğri incelendiğinde bu durum daha iyi anlaşılabilmektedir. B oranının %1,5 ve üzerine çıkmasına rağmen bağıl yoğunluk değerinde düşüş meydana gelmesinin aşırı sıvı faz oluşumundan kaynaklanmış olabileceği düşünülmektedir.

Şekil 4’te kullanılan D2 takım çeliği tozunun ve üretilen numunelerin XRD paternleri verilmiştir. Başlangıç tozunun su atomizasyonu ile üretilmiş olmasına bağlı olarak XRD paterninde sadece martenzit fazına ve M_7C_3 tipi karbürler için pikler bulunmaktadır. D2 takım

çeliği tozundan B ilavesi yapılmadan üretilen numunenin XRD paterninde, sinterleme işleminden sonra numunelerin fırında 10 °C/dk gibi yavaş bir hızla soğutulmasına bağlı olarak martenzit fazı yerine α -Fe’e ait pikler görülmektedir. α -Fe’e ek olarak bu numunenin XRD paterninde ostenit ve M_7C_3 tipi karbürler için pikler de bulunmaktadır. Tavlanmış çeliklerde karbürlerin çökmesi kromun karbona oranına bağlıdır. Bu oranın 3’ten az olması durumunda sadece sementit oluşur. Oranın 3’ten büyük olması durumunda ise Cr_7C_3 ve $Cr_{23}C_6$ tipi karbürler oluşur [31]. Ancak D2 takım çeliğinin sahip olduğu yüksek alaşım elementi içeriğinin sonucu olarak M_7C_3 tipi karbürlerin katılaşma esnasında birincil karbürler olarak oluştukları bildirilmektedir [2]. Mohammed ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada [32] yumuşatma tavlama işlemi yapılmış AISI D2 takım çeliğinin difraksiyon paterninde şimdiki çalışmayla uyumlu olarak sadece α -Fe ve M_7C_3 karbür fazlarına ait pikler bulunduğu rapor edilmiştir. Hamidzadeh ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilmiş olan başka bir çalışmada [6] dökümle üretilen AISI D2 takım çeliğinin XRD paterninde α -Fe ve M_7C_3 karbür ve kalıntı ostenit fazlarına ait piklerin tespit edildiği rapor edilmiştir. B ilave edilen numunelerin XRD paternleri, başlangıç tozunun ve D2 numunesinin XRD paternlerinden oldukça farklıdır. B’un sinterleme işlemi esnasında, FeB ve Fe_2B bileşiklerini oluşturması beklenen bir durum olup [19] bu bileşiklere ait pikler ağırlıkça %0,5 B oranından itibaren XRD paternlerinde görülmektedir. B ilavesi ile meydana gelen en büyük farklılık başlangıç tozunda ve D2 numunesinde bulunan M_7C_3 tipi karbürler için piklerin artan B oranıyla birlikte yok olması ve bunun yerine B ilave edilen tüm numunelerde yeni bir fazın oluşmasıdır. Bu faz $M_{23}(C,B)_6$ fazıdır. Kafes parametreleri $M_{23}C_6$ karbürleri ile aynı olan $M_{23}(C,B)_6$ boro-karbürlerinin yüksek B ve C içeren demir alaşımlarında X-ray difraksiyonu ile belirlendiği bildirilmektedir [33]. XRD paternlerinde $M_{23}(C,B)_6$ fazına ait piklerin şiddetinin artan B oranı ile birlikte arttığı görülmektedir. Buna karşılık α -Fe’e ait piklerin şiddeti B oranıyla ters orantılı bir şekilde azalma göstermektedir. Bombac ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada [25] dökümle

üretilmiş numunede M_7C_3 tipi karbürlerin ağırlıkta olduğu, ancak termomekanik işlem görmüş numunelerde yarıkararlı olan M_7C_3 tipi karbürlerin $M_{23}C_6$ tipi karbürlere dönüştüğü

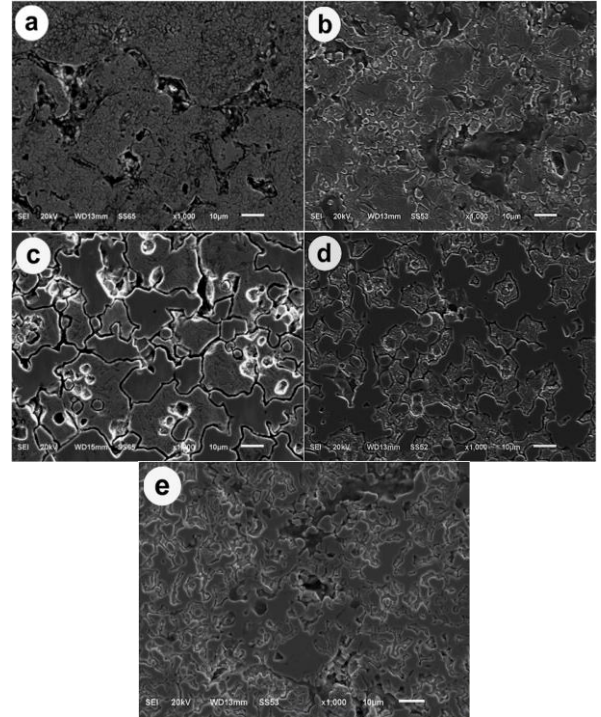
rapor edilmiştir. $M_{23}C_6$ karbürünün B bakımından zenginleşmesi sonucunda $M_{23}(C,B)_6$ boro-karbürünün oluştuğu bildirilmektedir [34].



Şekil 4. Üretilen toz metal parçaların XRD paternleri

Benzer şekilde Keown ve Pickering [33], B'un fcc karbürlere segregasyon olarak $M_{23}(C,B)_6$ ve $V_4(C,B)_3$ gibi boro-karbürleri oluşturduğunu bildirmişlerdir. Yukarıdaki açıklamalar göz önünde bulundurulduğunda şimdiki çalışmada yarıkararlı M_7C_3 tipi karbürlerin, B varlığından dolayı $M_{23}C_6$ tipi kararlı karbürler yerine $M_{23}(C,B)_6$ tipi boro-karbürlere dönüştüğü düşünülmektedir. Bunlara ek olarak XRD paternlerinden sinterleme işlemi esnasında Cr'un oksit bileşikler oluşturduğu da anlaşılmaktadır.

Şekil 5'te D2 ve 1 B numunelerinden alınan SEM görüntüleri verilmiştir. 1200 °C'de sinterlenen D2 numunesine ait SEM görüntüsünde malzeme içerisinde bol miktarda gözenek bulunduğu görülmektedir. Kullanılan başlangıç tozunun partikül boyutunun iri olmasına bağlı olarak tane boyutu da iridir. Malzemede hem tane sınırlarında hem de tane içlerinde bol miktarda çökelti bulunduğu görülmektedir. XRD analizinden elde edilen patern göz önünde bulundurulduğunda bu çökeltilerin M_7C_3 tipi karbürler olduğu söylenebilir. Bu karbürlerin birbiriyle bağlantılı olmayan blok morfolojiye sahip çökeltiler halinde olduğu görülmektedir.

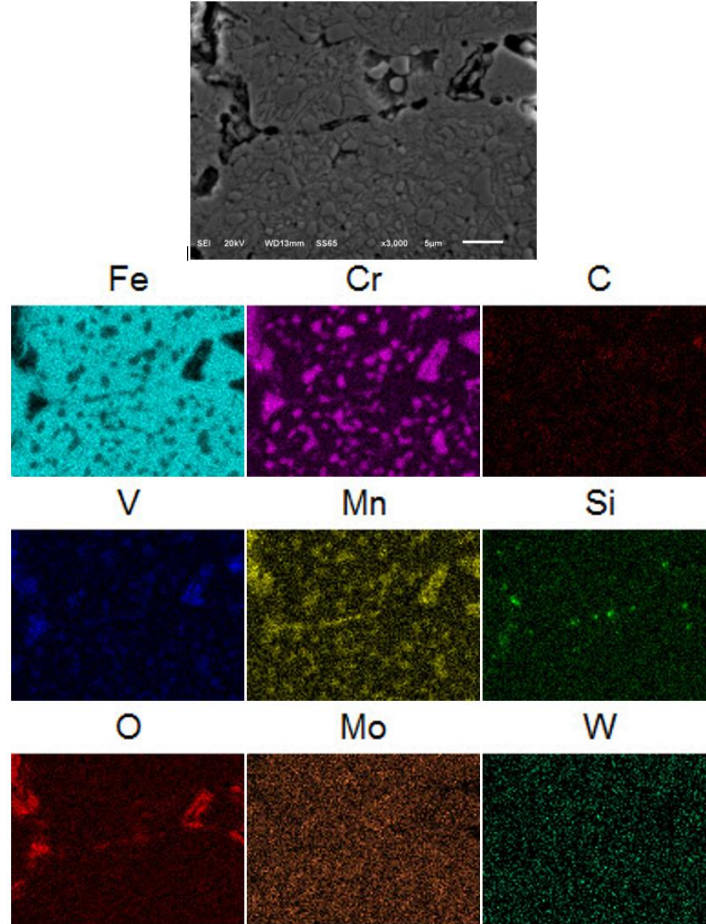


Şekil 5. a) D2, b) 0,5 B, c) 1 B, d) 1,5 B, e) 2 B numunelerinin SEM görüntüleri

%0,5 B numunesinden alınan SEM görüntüsünde gözenek miktarının D2 numunesine nazaran daha az olduğu

görülmektedir. D2 numunesiyle kıyaslandığında bu numunede de karbüre benzer çökeltiler görülmektedir. Ancak bu çökeltilerin boyutlarının D2 numunesindeki çökeltilere nazaran daha iri oldukları görülmektedir. Bu durum başlangıç tozunda varlığı XRD analizi ile ispat edilen M_7C_3 tipi karbürlerin B ilavesi ile farklı bir faza dönüştüğünü düşündürmektedir. XRD analizi ve mikroyapı görüntüleri birlikte ele alındığında, B ilave edilen numunelerde M_7C_3 tipi karbürlerin yeni oluşan $M_{23}(C,B)_6$ fazi için çekirdek gibi davrandığı düşünülmektedir. Artan B ilavesi ile birlikte XRD analizinden elde edilen paternlerdeki pik şiddetleri ile uyumlu olarak $M_{23}(C,B)_6$ boro-karbür fazi taneleri irileşmektedir. $M_{23}(C,B)_6$ boro-karbür fazının büyük taneler halinde bulunmasında M_7C_3 karbür

partiküllerinin $M_{23}(C,B)_6$ boro-karbürlerine dönüşürken irileşmesinin ve bu irileşme sonucu birbirleriyle birleşmelerinin rol oynadığı düşünülmektedir. Ağırlıkça %1 B içeren numunenin SEM görüntüsünde, mikroyapının iri ferrit ve $M_{23}(C,B)_6$ boro-karbür fazi tanelerinden oluştuğu görülmektedir. $M_{23}(C,B)_6$ boro-karbür tanelerinin birbirleriyle bağlantılı olmayıp keskin köşeler içerdikleri dikkat çekmektedir. Ağırlıkça %1,5 ve %2 B içeren numunelerde $M_{23}(C,B)_6$ boro-karbür taneleri birbirleriyle birleşerek sürekli bir ağ şekline dönüşmüşlerdir. Yoğunluk ölçümleri ile uyumlu olarak en az gözeneklilik %1 B içeren numunede görülürken B miktarının daha da artmasıyla mikroyapıda gözenekler de artmıştır.



Şekil 6. D2 numunesinden alınan SEM elementel haritalama analizine ait görüntüler

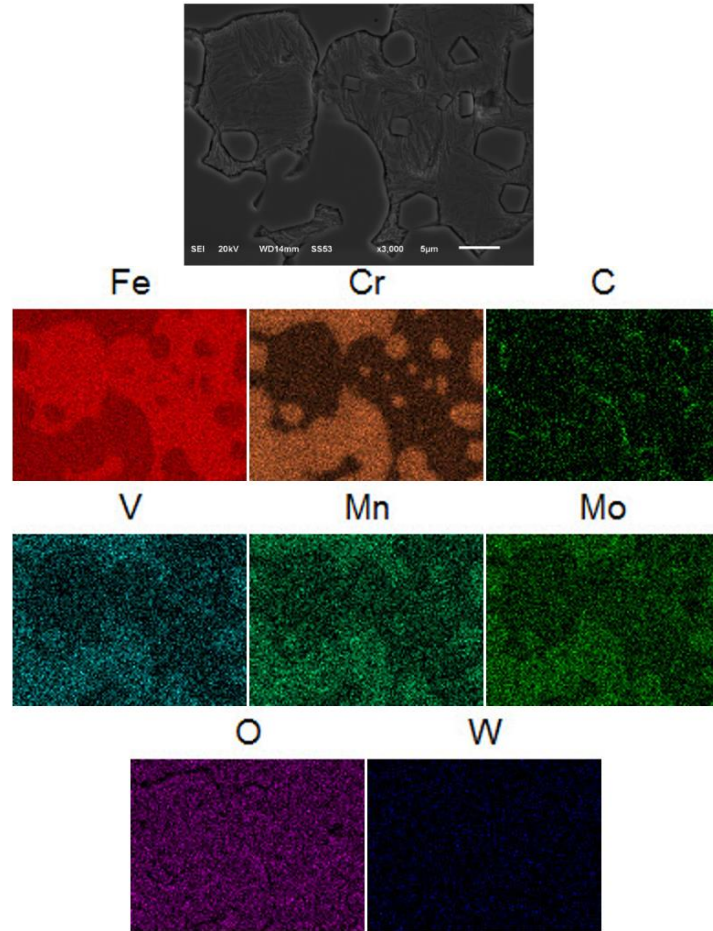
Şekil 6'da B ilavesi yapılmamış D2 numunesinden alınan SEM elementel haritalama analizine ait görüntüler verilmiştir. Bu

görüntülerde çökeltilerin olduğu bölgelerde Cr elementi miktarında artış olduğu ve buna C'un da eşlik ettiği görülmektedir. Bu durum bu

çökeltilerin Cr tarafından oluşturulmuş karbürler olduğunu kesinleştirmektedir. Bu karbürlerde Cr'a Fe, V, Mn gibi elementler de eşlik etmektedir. Oksijen elementinin dağılımı incelendiğinde genellikle tane sınırlarında miktarının artış sergilediği görülmektedir. Sinterleme işlemi yüksek saflıktaki Ar gazı atmosferinde gerçekleştirilmiş olmasına rağmen özellikle partikül yüzeylerinde oksitlenme meydana gelmiştir. XRD analizi verilerine göre bu oksitler Cr tarafından oluşturulmaktadır.

Şekil 7'de 1 B numunesinden alınmış SEM elementel haritalama analizine ait görüntüler verilmiştir. Görüntülerden iki farklı fazdan oluşan yapıda, Cr'ca zengin fazın olduğu bölgede

C elementinin miktarında güçlükle ayırt edilebilecek bir artış olduğu görülmektedir. Bu durumun Cr tarafından oluşturulan fcc yapılı karbürlerin içeresine sinterleme esnasında B'un difüze olarak $M_{23}(C,B)_6$ boro-karbür fazını oluşturmasına bağlanmaktadır. $M_{23}(C,B)_6$ boro-karbür fazının bulunduğu bölgelerde Fe elementini miktarında çok büyük bir azalma olmuştur. B, fcc karbürlere segregasyon olarak $M_{23}(C,B)_6$ ve $V_4(C,B)_3$ gibi boro-karbürleri oluşturmaktadır [33]. Bu açıklamaya uygun olarak V, Mn ve Mo gibi karbür yapıcı özelliğe sahip elementlerin $M_{23}(C,B)_6$ fazı içerisindeki yoğunluğu ferrit fazına kıyasla daha yüksek görünmektedir.

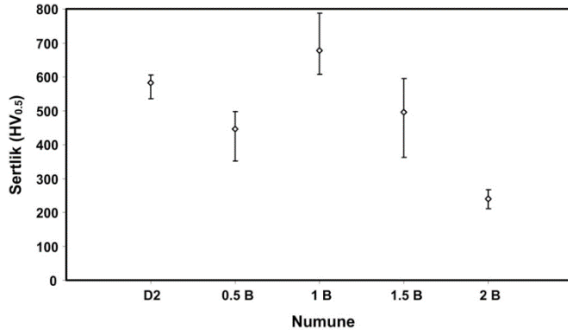


Şekil 7. 1B numunesinden alınan SEM elementel haritalama analizine ait görüntüler

Şekil 8'de numunelerden elde edilen sertlik değerleri verilmiştir. En yüksek sertlik değerine %1 B içeren numunede ulaşılmıştır. Bu değer 700 HV civarındadır. Muro ve arkadaşları [11] tarafından yapılan bir çalışmada, HIP tekniği ile

üretilen ve ısıtılma işlemi tabi tutulan D2 takım çeliğinden ölçülen sertlik değerinin 61 HRC olduğu belirtilmiştir. Bu değer yaklaşık 720 Vickers sertlik değerine tekabül etmektedir. Şimdiki çalışmada HIP işlemi olmaksızın

geleneksel T/M ile üretilen ve ağırlıkça %1 B içeren numunede sertleştirme ısı işlemi uygulanmadan Muro ve arkadaşlarının bulduğu sonuca yakın sertlik değeri elde edilmiştir. %1'den daha yüksek oranda B ilavesinin sertliğin düşmesine yol açtığı görülmektedir. Bu durumun ağırlıkça %1,5 ve %2 B ilave edilen numunelerin bağıl yoğunluklarının düşük olmasından kaynaklanmış olabileceği düşünülmektedir.



Şekil 8. Üretilen toz metal çelik parçaların sertlik değerleri

4. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada D2 takım çeliği tozuna farklı oranlarda amorf bor ilavesi yapılarak T/M yöntemi ile parça üretimi gerçekleştirilmiştir. Bor ilavesinin mikroyapı ve mekanik özelliklere etkileri incelenmiş ve yapılan deneysel çalışmalardan aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

a. B ilavesi, D2 takım çeliğinin sinterlenme özelliklerini ve mikroyapısını önemli ölçüde değiştirmiştir. Ağırlıkça %1'e kadar yapılan B ilavesi ile daha düşük sıcaklıklarda daha yüksek bağıl yoğunluk değerlerine ulaşılabilirken B oranının %1'i aşmasıyla bağıl yoğunluk değerlerinde düşüş gözlenmiştir.

b. Bor ilavesi mikroyapıda değişime yol açmıştır. Mikroyapıda meydana gelen değişim, katkısız D2 tozundan üretilen numunede görülen karbürlerin, B ilave edilmiş numunelerde M23(C,B)6 tipi boro-karbürlere dönüşmesi şeklindedir. Artan B oranı ile söz konusu durum daha belirgin bir hal almıştır.

c. XRD analizi, ilave edilen B elementinin mikroyapıda Fe ve Cr ile bileşikler oluşturduğunu göstermiştir.

d. B ilave edilerek üretilen numunelerin sertlikleri ısı işlem olmaksızın D2 takım çeliğinde ısı işlem yapılarak ulaşılabilen sertlik

değerine yaklaşmıştır. En yüksek sertlik değerine ağırlıkça %1 B içeren numunede ulaşılmıştır. %1'in üstünde artan B miktarıyla birlikte sertlikte düşüş görülmüştür. Bu durumun bağıl yoğunluk değerlerindeki azalmadan kaynaklanmış olabileceği düşünülmektedir.

5. Teşekkür

Bu çalışma, BAP-376-205-2014 proje numarası ile Bingöl Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmiştir. Çalışmalar sırasında gösterdikleri ilgi ve harcadıkları emeklerinden dolayı BÜBAP birimi çalışanlarına ve Bingöl Üniversitesi Merkezi Laboratuvarı çalışanlarına teşekkürlerimi sunarım.

6. Kaynaklar

1. Budinski, K.G. (1992). Engineering Materials, Properties and Selection. *Prentice Hall*, New Jersey, 373–411.
2. Bourithis, L., Papadimitriou, G.D. and Sideris, J. (2006). Comparison of wear properties of tool steels AISI D2 and O1 with the same hardness. *Tribology International*, **39**: 479–489.
3. Glaeser, W.A. (1992). Materials for Tribology. *Tribology Series*, **20**, Elsevier, 33–37.
4. Roberts, G., Krauss, G. and Kennedy, R. (1998). Tool Steels. **5**, ASM International, Ohio.
4. Thorpe, W.R. and Chicco, B. (1985). The Fe-rich corner of the metastable C-Cr-Fe liquidus surface. *Metallurgical and Materials Transactions A*, **16**(9): 1541–1549.
5. Hamidzadeh, M.A., Meratian, M. and Zahrani, M.M. (2012). A study on the microstructure and mechanical properties of AISI D2 tool steel modified by niobium. *Materials Science and Engineering A*, **556**: 758–766.
6. Tumko, A.N. (1996). Production of large forgings from high-chromium ledeburitic steels. *Steel in Translation*, **26**: 73–76.
7. Berns, H. and Broeckmant, C. (1997). Fracture of hot formed ledeburitic chromium steels. *Engineering Fracture Mechanics*, **58**: 311–325.
8. Kheirandish, S., Sagharian, H., Hedjazi, J. and Momeni, M. (2010). Effect of heat treatment on microstructure of modified cast AISI D3 cold work tool steel. *Journal of Iron and Steel Research, International*, **17**(9): 40–45.
9. Novak, P., Vojtech, D. and Serak, J. (2005). Pulsed-plasma nitriding of a niobium-alloyed PM tool steel. *Materials Science and Engineering A*, **393**: 286–293.

10. Muro, P., Gimenez, S. and Iturriza, I. (2002). Sintering behaviour and fracture toughness characterization of D2 matrix tool steel, comparison with wrought and PM D2. *Scripta Materialia*, **46**(5): 369–373.
11. Ernst, I.C. and Duh, D. (2004). Properties of cold-work tool steel X155CrVMo12-1 produced via spray forming and conventional ingot casting. *Journal of Materials Science*, **39**: 6835–6838.
12. Schulz, A., Uhlenwinkel, V., Escher, C., Kohlmann, R., Kulmburg, A., Montero, M.C., Rabitsch, R., Schutzenhfer, W., Stocchi, D. and Viale, D. (2008). Opportunities and challenges of spray forming high-alloyed steels. *Materials Science and Engineering A*, **477**: 69–79.
13. Gülsoy, H.Ö., Bilici, M.K., Bozkurt, Y. and Salman, S. (2007). “Enhancing the wear properties of iron based powder metallurgy alloys by boron additions, *Materials and Design*, **28**: 2255-2259.
14. Weber, S., Theisen, W., Castro, F. and Pyzalla, A. (2009). Influence of gas atmosphere and hard particle addition on the sintering behavior of high alloyed PM cold work tool steels. *Materials Science and Engineering A*, **515**: 175-182.
15. Dudrova, E., Selecka, M., Bures, R. and Kabatova, M. (1997). Effect of boron addition on microstructure and properties of sintered Fe-1.5Mo powder materials. *ISIJ International*, **37**(1): 59-64.
16. Bakan, H.I., Heaney, D. and German, R.M. (2001). Effect of nickel boride and boron additions on sintering characteristics of injection moulded 316L powder using water soluble binder system. *Powder Metallurgy*, **44**(1): 235-242.
17. Sercombe, T.B. (2003). Sintering of freeformed maraging steel with boron additions. *Materials Science and Engineering A*, **363**: 242–252.
18. Selecká, M., Šalak, A. and Danninger, H. (2003). The effect of boron liquid phase sintering on properties of Ni-, Mo- and Cr-alloyed structural steels. *Journal of Materials Processing Technology*, **141**: 379–384.
19. Gülsoy, H.Ö., Salman, S. and Özbek, S. (2004). Effect of FeB additions on sintering characteristics of injection moulded 17-4PH stainless steel powder. *Journal of Materials Science*, **39**: 4835-4840.
20. Cabral Miramontes, J.A.C., Barceinas Sanchez, J.D.O., Almeraya Calderon, F., Martinez Villafane, A. and Chacon Nava, J.G. (2010). Effect of Boron additions on sintering and densification of a ferritic stainless steel. *Journal of Materials Engineering and Performance*, **19**(6): 880-884.
21. German, R.M. and Rabin, B.H. (1985). Enhanced sintering through second phase additions. *Powder Metallurgy*, **28**(1): 7-12.
22. Madan, D.S. (1991). Enhanced sintering and property improvement in ferrous P/M compacts. *International Journal of Powder Metallurgy*, **27**(4): 339-345.
23. Zovas, P.E., German, R.M., Hwang, K.S. and Li, C.J. (1983). Activated and liquid-phase sintering – progress and problems. *The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society*, **35**(1): 28-33.
24. Bombac, D., Fazarinc, M., Saha Podder, A. and Kugler, G. (2013). Study of carbide evolution during thermo-mechanical processing of AISI D2 tool steel. *Journal of Materials Engineering and Performance*, **22**(3): 742–747.
25. Vallotton, J., Herlach, D.M. and Henein, H. (2016). Effect of convection on the dendrite growth kinetics in undercooled melts of D2 tool steels, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **117**: 1-5. doi:10.1088/1757-899X/117/1/012058.
26. Özgün, Ö., Gülsoy, H.Ö., Yılmaz, R. and Fındık, F. (2013). Microstructural and mechanical characterization of injection molded 718 superalloy powders. *Journal of Alloys Compounds*, **576**: 140–153.
27. Özgün, Ö., Gülsoy, H.Ö., Fındık, F. and Yılmaz, R. (2012). Microstructure and mechanical properties of injection moulded Nimonic-90 superalloy parts. *Powder Metallurgy*, **55**: 405–414.
28. Liao, P.K. and Spear, K.E. (1992). ASM Handbook: Alloy Phase Diagram, ASM International, Materials Park, OH.
29. Narasimhan, K.S. (2001). Sintering of powder mixtures and the growth of ferrous powder metallurgy. *Materials Chemistry and Physics*, **67**: 56–65.
30. Singh, K., Khatirkar, R.K. and Sapate, S.G. (2015). Microstructure evolution and abrasive wear behavior of D2 steel. *Wear*, **328**: 206-216.
31. Mohammed, M.N., Omar, M.Z., Syarif, J., Sajuri, Z., Salleh, M.S. and Alhawari, K.S. (2013). Microstructural evolution during DPRM process of semisolid ledeburitic D2 tool steel. *The Scientific World Journal*, **2013**, 1-7.
32. Keown, S.R. and Pickering, F.B. (1977). Some aspects of the occurrence of boron in alloy steels. *Metal Science*, **11**(7): 225-234.
33. Wang, L. (2010). Development of Predictive Formulae for the A1 Temperature in Creep Strength Enhanced Ferritic Steels. *Master's Thesis*, The Ohio State University.

Yağ Pompasında Kullanılan Sikloidal Dişlilerin Parmak Freze ile CNC Freze Tezgâhlarında İmalatının Araştırılması

Cihan ÖZEL¹, Yunus ORTAÇ¹, Turan GÜRGENÇ²

¹Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, 23119 ELAZIĞ

²Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Otomotiv Mühendisliği Bölümü, 23119 ELAZIĞ

cozel@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 28.02.2017; Kabul/Accepted: 06.06.2017)

Özet

Bu çalışmada, hidrolik endüstrisinde yaygın bir şekilde kullanılan sikloidal dişli yağ pompalarındaki iç rotorun, geleneksel imalat yöntemlerindeki zorlukları ortadan kaldırmak için CNC freze tezgâhlarında imalatı amaçlandı. Bunun için radyal kesme yöntemi belirlendi. Bu yöntemle göre, sikloidal dişlileri işlemek için imalat denklemleri türetildi. Bu dişlilerin CAM kodlarını elde etmek için bir C++ programı geliştirildi. Bu program ile otomatik CAM kodlarını oluşturma, G ve M kodları kullanılarak yapıldı. Bu CAM kodları ile Dyna 4M CNC freze tezgâhında çeşitli ölçülerde sikloidal dişliler imal edildi. Bu yöntemle imal edilen sikloidal dişlinin diş ölçüleri, elektronik bir kumpas ile ölçüldü. Daha sonra, bu ölçüler ile matematiksel bağıntılar kullanılarak hesaplanan diş ölçüleri bir tabloda karşılaştırıldı. Bulunan sonuçlara göre, bu dişlilerin CNC freze tezgâhlarında imal edilebilecekleri görüldü ve bu tezgâhlarda sikloidal dişlilerin imalatlarının genel bir değerlendirilmesi yapıldı.

Anahtar Kelimeler: Sikloidal dişli pompa, İç rotor, İşleme.

Investigation of the Manufacturing of Cycloidal Gears Used in Oil Pumps with the End Mill in CNC Milling Machines

Abstract

In this study, the manufacturing of the internal rotor in the cycloidal gear oil pumps widely used in the hydraulic industry was aimed to be performed in CNC milling machines to remove the difficulties in conventional manufacturing methods. For this purpose, the radial cutting method was determined. According to this method, manufacturing equations were derived for machining cycloidal gears. A C++ program was developed to obtain the CAM codes of these gears. Automatic CAM coding was performed with this program using G and M codes. The cycloidal gears of various dimensions were manufactured with these CAM codes in Dyna 4M CNC milling machine. Tooth measurements of the cycloidal gear manufactured with this method were measured with an electronic calliper. Then, the tooth measurements calculated using mathematical relations were compared with these measurements in a table. According to the results obtained, it was observed that these gears could be manufactured in CNC milling machines, and a general evaluation of the manufacturing of the cycloidal gears in these machines was performed.

Keywords: Cycloidal gear pump, Inner rotor, Machining.

1. Giriş

Sikloidal dişliler hidrolik endüstrisinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Özellikle bu taşıma kabiliyetlerine sahiptirler. Diş profili boyunca adhezyon aşınmasının yayılışı, evolvent profiline göre çok daha düzgündür ve çok küçük diş sayılarında bile alt kesilme olayı meydana gelmez. Yine bilindiği gibi yüksek tahvil oranlarına ihtiyaç duyulan çoğu makinelerde,

dişlilerin, diş profilleri birbirinden farklı iki eğriden oluştuğundan hatasız bir diş profili açmak güçtür [1]. Sikloidal dişliler, diğer dişlilere göre daha büyük yüzey basınçlarını yüksek hız redüktörleri kullanılmaktadır. Buna bağlı olarak en küçük dişli mekanizması olarak sikloidal planet dişli mekanizmasının olduğu bilinir [2]. Bu tür dişli sistemlerinin avantajı şöyle sıralanabilir; bir turda yüksek tahvil oranı, yüksek kavrama oranı, millerin eş eksenli olması ve

yuvarlanma sürtünmesi kafes içerisinde meydana geldiğinden enerji kaybı düşüktür [3-6]. Bütün bu üstün özelliklere sahip olan sikloidal dişliler işlenirken özel kesici ve takım tezgâhlarına ihtiyaç duyulması, imalat sektöründe karşılaşılan başlıca sorunlardır ve bu dişlilerin istenilen hassasiyette imal edilememesinden dolayı endüstrideki kullanım alanı yeterince yaygınlaşmamıştır [7 ve 8]. Bu durum özellikle küçük atölyeler için önemli bir problem oluşturmaktadır. Çünkü herhangi bir nedenle imal edilmesi gereken sikloidal dişliler küçük atölyelerde hassas bir şekilde işlenememektedir.

Son zamanlarda yapılan çalışmaların birinde, sikloidal bir pompanın rotor profillerinin geometrisi değiştirilmiş ve diş temas noktalarının analizleri yapılmıştır [9]. Başka bir çalışmada, otomobillerde kullanılan sikloidal dişli yağ pompalarının PM rotorlarındaki aşınmalar incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar ile malzeme özellikleri optimize edilerek yüksek dirençli PM rotorları ekonomik olarak üretilmiştir [10]. Malhatra ve arkadaşı, bir sikloidal hız redüktörünün teorik verimini ve bu redüktörün güç iletimini analiz ettiler. Ayrıca bu tip hız redüktörlerinin optimum tasarımını da yaptılar [11]. Jordan ve arkadaşı, yapmış oldukları çalışmada, hiposikloidal iç ve dış polihedral yüzeylerin torna tezgâhında, matkap tezgâhında ve freze tezgâhında işlenebilmesi için yeni bir takım geliştirmiş ve bu takımın geometrisini sunmuşlardır [12 ve 13]. Faydor ve arkadaşları, sikloidal pompa ve sonsuz vida çarkı için diş yüzeylerinin zarf oluşumlarını analitik olarak inceleyip sonuçları grafiksel olarak göstermişlerdir [14]. S. M. Shraibman tarafından yapılan çalışmada, çeşitli üretim tarzlarında diş kesme operasyonlarının istatistiki planı araştırılmıştır [15]. G. Elber ve E. Cohen, tarafından yapılan çalışmada, çeşitli yüzey modelleri için takım yollarını oluşturmaya yönelik bir algoritma geliştirmişlerdir [16]. L. P. Zhang ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada, kalıp yüzeyini mevcut uygulamalardan farklı bir şekilde modifiye ederek, 3 eksenli CNC freze tezgâhında küresel uçlu freze esas alınarak takım yolunun yeniden türetilmesi için bir algoritma önermişlerdir. Önermiş oldukları bu algoritmayı, çeşitli parçaların imalatlarında denemişler ve algoritmanın güvenilir olduğunu göstermişlerdir

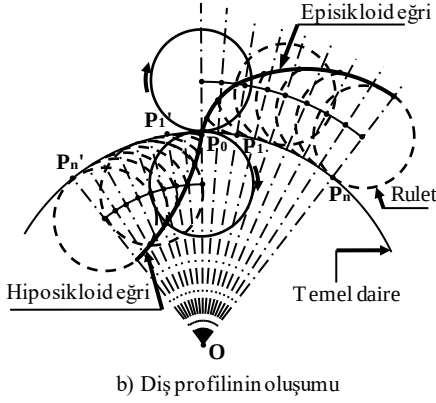
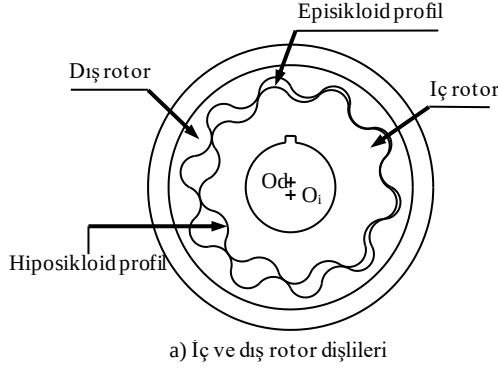
[17]. Özel C. ve arkadaşları, düz konik dişlilerin CNC freze tezgâhlarında imalatlarını araştırmışlar ve geliştirmiş oldukları CAM programı ile dik işlem merkezli CNC freze tezgâhlarında düz konik dişlilerin imalatlarını yapmışlardır [18]. Özel C., tarafından yapılan diğer çalışmada ise, CNC frezede düz dişlilerin üretim süreleri ve üretim hataları üzerine araştırmalar yapılmıştır [19 ve 20]. C. Özel ve Y. Ortaç, sikloidal dişlinin dış profilindeki kesilme hatalarını veren parametrik ifadeleri türetmişler ve dişlinin tasarım parametrelerine göre diş profili hatalarını MATLAB ortamında incelemişlerdir [21].

Bu çalışmada ise, piyasalardaki sikloidal dişli imalatlarına bir katkı sağlamak için bu tür dişlilerin işlenmesinde kullanılan özel kesici, aparat ve takım tezgâhlarına gerek kalmadan, parmak freze ile dik işlem merkezli CNC freze tezgâhında imalatları araştırılmıştır.

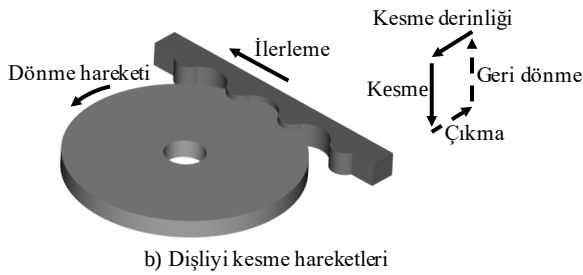
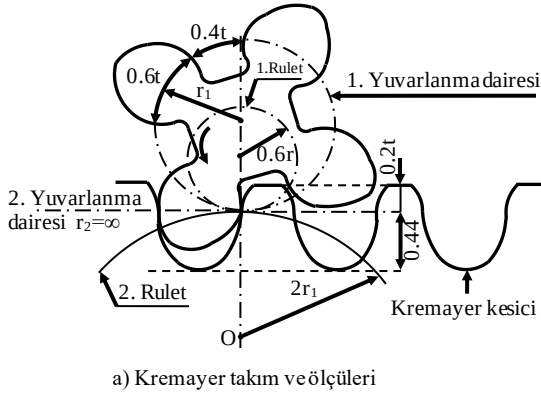
2. Materyal ve Yöntem

2.1. CNC freze tezgâhında sikloidal dişlilerin kesilmesi

Hidrolik endüstrisinde sikloidal dişli yağ pompaları iç ve dış rotor birlikte çalışarak yağ pompalama işlemlerinde yoğun bir şekilde kullanılmaktadır (Şekil 1a). Bilindiği gibi, sikloidal dişlinin dış profilleri episikloid ve hiposikloid eğrilerden oluşmaktadır (Şekil 1b). Endüstride sikloidal dişliler genellikle yuvarlanma yöntemi ile işlenirler. Bu yöntem kullanılarak sikloidal dişliler işlenirken özel takım tezgâhlarına ve özel kesicilere ihtiyaç duyulmaktadır [7]. Bu yöntemde kullanılan kremayer takımın, imal edilecek dişlinin tasarım parametrelerine uygun olması gerekir (Şekil 2a). Bu kesici ile diş açma işleminde dişli taslağı kendi eksen etrafında dönerken, kremayer kesici aşağı-yukarı ve eksenel olarak da ilerleme hareketi yaparak dişli taslağını keser (Şekil 2b) [7].

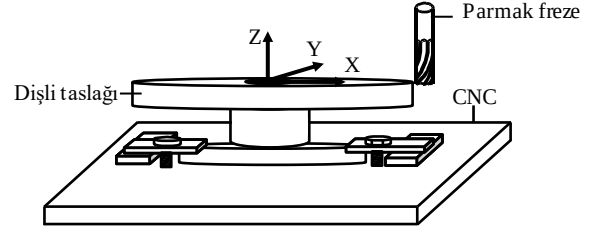


Şekil 1. Sikloidal dişlili yağ pompası



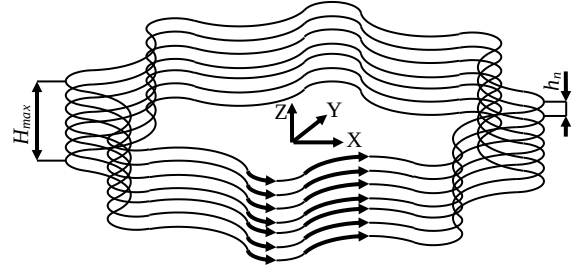
Şekil 2. Kremayer kesici ile sikloidal dişlinin işlenmesi

Bu çalışmada, yukarıda bahsedilen zorlukları ortadan kaldırmak için, yağ pompasının iç rotor dişlisinin CNC freze tezgâhında parmak freze ile imalatı amaçlandı. Dişlinin imalatı yapılırken kesici takımın aynı anda üç eksen üzerinde hareket edebildiği dik işlem merkezli Dyna 4M CNC freze tezgâhı kullanılmıştır (Şekil 3). Bu tezgâhta sikloidal dişliyi işlemek için dişli taslağı tezgâh tablasına bir divizör, mengene veya direkt olarak cıvata ve pabuçlarla bağlanabilir (Şekil 3).



Şekil 3. Dişli taslağının CNC freze tezgâhına bağlanması

Sikloidal dişli taslağının, Şekil 3 deki gibi dik işlem merkezli CNC freze tezgâhının tablasına bağlanması durumunda, parmak freze dişli taslağını Z eksen boyunca X-Y düzlemine paralel düzlemler boyunca radyal olarak keser (Şekil 4).



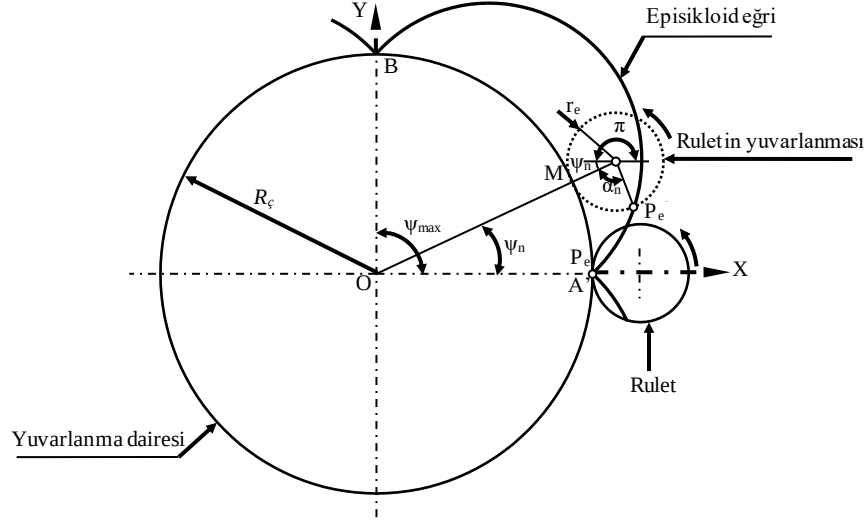
Şekil 4. Radyal işleme için takım yolları

Burada, iki tabaka arasındaki h_n yüksekliği, parmak frezenin kesebileceği maksimum talaş kesme kalınlığı ve H_{max} ise sikloidal dişlinin diş boyunun uzunluğu olarak tanımlandı. Bu yöntemle göre, dişliyi işleyebilmek için sikloidal dişlinin diş profil eğrilerinin oluşum prensipleri dikkate alınarak, parmak frezenin parametrik takım yolu denklemleri aşağıdaki bölümde verildi.

2.2. Sikloidal dişlinin dış profil eğrileri

Bilindiği gibi, sikloidal dişlilerin dış üstü profili episikloid bir eğridir. Episikloid eğri bir

dairenin üzerinde kaymadan yuvarlanan bir başka dairenin (rulet) üzerindeki bir P_e noktasının takip ettiği yörüngedir (Şekil 5).



Şekil 5. Episikloid dış profilinin oluşumu

Şekil 5' de ruletin üzerindeki P_e noktası, rulet yuvarlanmaya başlamadan önce rulet üzerindeki bir noktadır. Ruletin yuvarlanma dairesinin üst tarafında yuvarlanması sonucu, P_e' noktasının koordinatları aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$xe_n = (R_ç + r_e) \cdot \cos \psi_n + r_e \cdot \cos(\pi + \psi_n + \alpha_n) \quad (1)$$

$$ye_n = (R_ç + r_e) \cdot \sin \psi_n + r_e \cdot \sin(\pi + \psi_n + \alpha_n) \quad (2)$$

Burada, (1) ve (2) denklemleri düzenlenirse aşağıdaki ifadeler yazılabilir.

$$xe_n = (R_ç + r_e) \cdot \cos \psi_n - r_e \cdot \cos(\psi_n + \alpha_n) \quad (3)$$

$$ye_n = (R_ç + r_e) \cdot \sin \psi_n - r_e \cdot \sin(\psi_n + \alpha_n) \quad (4)$$

Yine Şekil 5' den aşağıdaki (5) ifadesi yazılabilir.

$$R_ç \cdot \psi_n = r_e \cdot \alpha_n \quad (5)$$

Bu eşitlikten de (6) ifadesi yazılabilir.

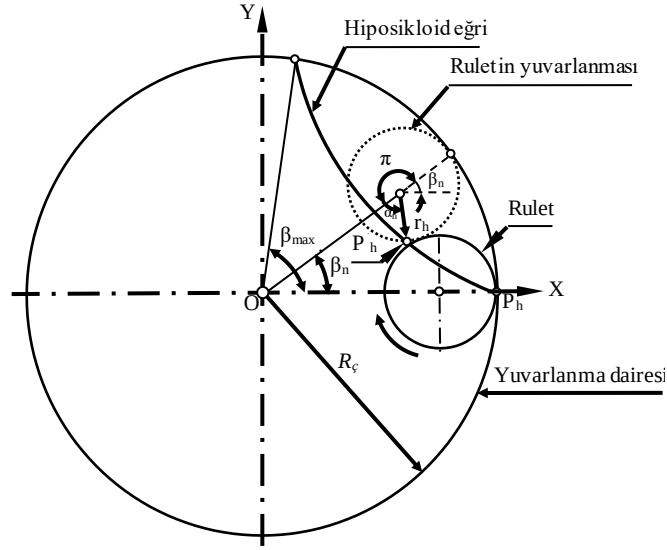
$$\alpha_n = \frac{R_ç \cdot \psi_n}{r_e} \quad (6)$$

Bulunan bu ifadeye göre, (3 ve 4) denklemleri düzenlenirse, episikloid profil için parametrik denklemler aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$xe_n = (R_ç + r_e) \cdot \cos \psi_n - r_e \cdot \cos \left[\frac{(R_ç + r_e)}{r_e} \cdot \psi_n \right] \quad (7)$$

$$ye_n = (R_ç + r_e) \cdot \sin \psi_n - r_e \cdot \sin \left[\frac{(R_ç + r_e)}{r_e} \cdot \psi_n \right] \quad (8)$$

Sikloidal dişlilerin dış dişi profili ise hiposikloid bir eğridir. Bilindiği gibi hiposikloid eğri, bir dairenin iç kısmında kaymadan yuvarlanan bir başka dairenin (rulet) üzerindeki bir noktanın oluşturduğu eğridir. Şekil 6' da rulet üzerindeki P_h noktası, rulet yuvarlanmaya başlamadan önce onun üzerindeki bir noktadır.



Şekil 6. Hiposikloid dış profilinin oluşumu

Bu durumda, P_h ' noktasının koordinatları aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$x_{h_n} = (R_\zeta - r_h) \cdot \cos \beta_n + r_h \cdot \cos(\beta_n + \pi + \alpha_n) \quad (9)$$

$$y_{h_n} = (R_\zeta - r_h) \cdot \sin \beta_n + r_h \cdot \sin(\beta_n + \pi + \alpha_n) \quad (10)$$

Burada (9) ve (10) denklemleri düzenlenirse, aşağıdaki (11) ve (12) denklemleri yazılabilir.

$$x_{h_n} = (R_\zeta - r_h) \cdot \cos \beta_n - r_h \cdot \cos(\beta_n + \alpha_n) \quad (11)$$

$$y_{h_n} = (R_\zeta - r_h) \cdot \sin \beta_n - r_h \cdot \sin(\beta_n + \alpha_n) \quad (12)$$

Yine Şekil 6' dan aşağıdaki ifadeler yazılabilir.

$$R_\zeta \cdot \beta_n = r_h \cdot (\pi - \alpha_n) \quad (13)$$

$$\alpha_n = \pi - \frac{R_\zeta \cdot \beta_n}{r_h} \quad (14)$$

Bulunan bu ifadeye göre (11) ve (12) denklemleri düzenlenirse, hiposikloid profil için parametrik denklemler aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$x_{h_n} = (R_\zeta - r_h) \cdot \cos \beta_n + r_h \cdot \cos \left[\frac{(R_\zeta - r_h)}{r_h} \cdot \beta_n \right] \quad (15)$$

$$y_{h_n} = (R_\zeta - r_h) \cdot \sin \beta_n - r_h \cdot \sin \left[\frac{(R_\zeta - r_h)}{r_h} \cdot \beta_n \right] \quad (16)$$

2.3. Sikloidal dişlinin takım yolu denklemleri

(7), (8), (15) ve (16) denklemlerine göre sikloidal dişli işlenirse, işlenmek istenen sikloidal dişliden farklı boyutlarda bir sikloidal dişli imal edilir. Çünkü bu ifadeler, takım yarıçapı eklenmemiştir. Bu ifadeler, Şekil 7' den aşağıdaki gibi yazılabilir [21].

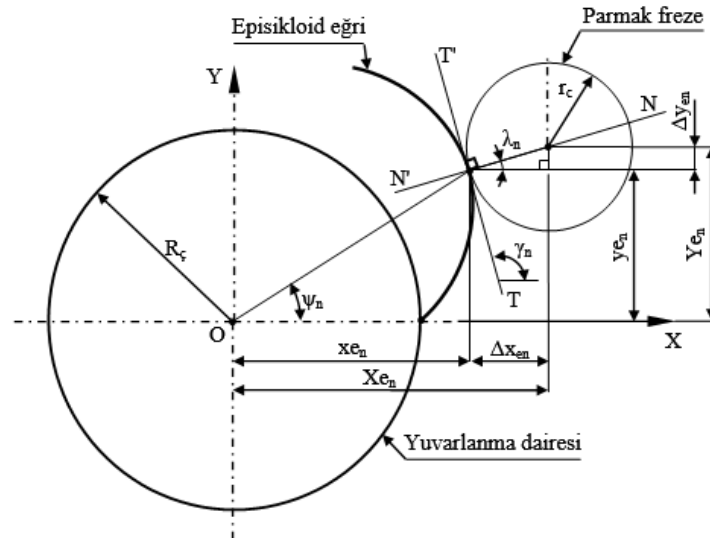
$$X_{e_n} = x_{e_n} + \Delta x_n \quad (17)$$

$$Y_{e_n} = y_{e_n} + \Delta y_n \quad (18)$$

Yine Şekil 7' den Δx_n ve Δy_n için aşağıdaki ifadeler de yazılabilir.

$$\Delta x_n = r_c \cdot \cos \lambda_n \quad (19)$$

$$\Delta y_n = r_c \cdot \sin \lambda_n \quad (20)$$



Şekil 7. Parmak frezenin episikloid eğri üzerindeki konumu (üst görünüş)

(19) ve (20) denklemlerindeki λ_n açısı, episikloid profil için türetilen (7) ve (8) denklemlerinin ψ_n açısına göre türevleri alınarak hesaplanabilir.

$$m_n = \tan \lambda_n = -\frac{dx_{e_n}}{dy_{e_n}} \quad (25)$$

λ_n açısı ise (25) ifadesinden aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\frac{dx e_n}{d\psi_n} = -(R_\zeta + r_e) \cdot \sin \psi_n + (R_\zeta + r_e) \cdot \sin\left(\frac{R_\zeta + r_e}{r_e} \cdot \psi_n\right) \quad (21)$$

$$\lambda_n = \tan^{-1}(-\frac{dxe_n}{dye_n}) \quad (26)$$

$$\frac{dye_n}{d\psi_n} = (R_\zeta + r_e) \cdot \cos\psi_n - (R_\zeta + r_e) \cdot \cos\left(\frac{R_\zeta + r_e}{r_e} \cdot \psi_n\right) \quad (22)$$

Yine (21) ve (22) ifadeleri, (26) denkleminde yerine yazılırsa λ_n açısı için aşağıdaki denklem türetilir.

Bu denklemlerden, Şekil 7' deki T-T' teğetinin eğimi için aşağıdaki ifade yazılabilir.

$$m_{te} = \tan \gamma_n = \frac{dy_{e_n}}{dx_{e_n}} \quad (23)$$

$$\lambda_n = \tan^{-1} \left(-\frac{(R_\zeta + r_e) \cdot \sin \psi_n + (R_\zeta + r_e) \cdot \sin\left(\frac{R_\zeta + r_e}{r_e} \psi_n\right)}{(R_\zeta + r_e) \cdot \cos \psi_n - (R_\zeta + r_e) \cdot \cos\left(\frac{R_\zeta + r_e}{r_e} \psi_n\right)} \right) \quad (27)$$

Bilindiği gibi, teğetin eğimi ile normalin eğimi arasındaki ilişki, aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$m_t.m_n = -1 \quad (24)$$

Bu durumda, (23) ve (24) ifadelerinden normalin eğimi için aşağıdaki eşitlik yazılabilir.

(27) ifadesi, (19) ve (20) denklemlerinde yazılırsa Δx ve Δy ifadeleri sırası ile aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\Delta x_n = r_c \cdot \cos \left[\tan^{-1} \left(\frac{-(R_\zeta + r_e) \cdot \sin \psi_n + (R_\zeta + r_e) \cdot \sin \left(\frac{R_\zeta + r_e}{r_e} \cdot \psi_n \right)}{(R_\zeta + r_e) \cdot \cos \psi_n - (R_\zeta + r_e) \cdot \cos \left(\frac{R_\zeta + r_e}{r_e} \cdot \psi_n \right)} \right) \right] \quad (28)$$

$$\Delta y_n = r_c \cdot \sin \left[\tan^{-1} \left(-\frac{(R_\zeta + r_e) \cdot \sin \psi_n + (R_\zeta + r_e) \cdot \sin \left(\frac{R_\zeta + r_e}{r_e} \cdot \psi_n \right)}{(R_\zeta + r_e) \cdot \cos \psi_n - (R_\zeta + r_e) \cdot \cos \left(\frac{R_\zeta + r_e}{r_e} \cdot \psi_n \right)} \right) \right] \quad (29)$$

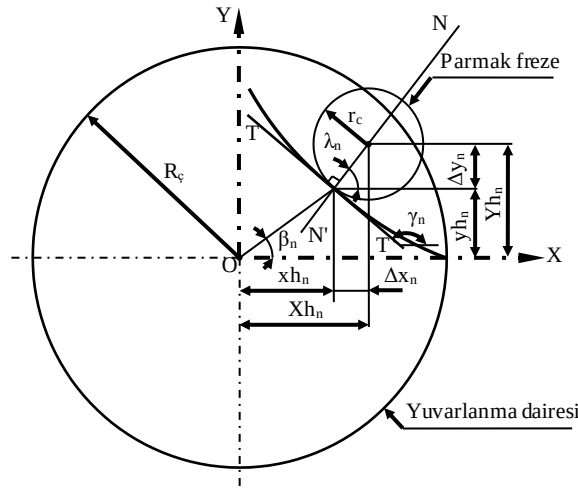
$$y_{e_n} = y_{e_n} + r_c \cdot \sin \left[\tan^{-1} \left(-\frac{(R_\zeta + r_e) \cdot \sin \psi_n + (R_\zeta + r_e) \cdot \sin \left(\frac{R_\zeta + r_e}{r_e} \cdot \psi_n \right)}{(R_\zeta + r_e) \cdot \cos \psi_n - (R_\zeta + r_e) \cdot \cos \left(\frac{R_\zeta + r_e}{r_e} \cdot \psi_n \right)} \right) \right] \quad (31)$$

(28) ve (29) ifadeleri de, (17) ve (18) denklemlerinde yazılır ise episikloid profil için takım yolu denklemleri aşağıdaki gibi bulunur.

$$X_{e_n} = x_{e_n} + r_c \cdot \cos \left[\tan^{-1} \left(-\frac{(R_\zeta + r_e) \cdot \sin \psi_n + (R_\zeta + r_e) \cdot \sin \left(\frac{R_\zeta + r_e}{r_e} \cdot \psi_n \right)}{(R_\zeta + r_e) \cdot \cos \psi_n - (R_\zeta + r_e) \cdot \cos \left(\frac{R_\zeta + r_e}{r_e} \cdot \psi_n \right)} \right) \right] \quad (30)$$

$$Z_{e_n} = H_{\max} \text{ (sabit)} \quad (32)$$

Sikloidal dişlinin hiposikloid profili için takım yolu denklemlerinin türetilmesi de, episikloid profile benzer şekilde yapıldı (Şekil 8) [21].



Şekil 8. Parmak frezinin hiposikloid eğri üzerindeki konumu (üst görünüş)

Hiposikloid eğri üzerinde kesici merkezinin konumu ile ilgili ifadeler, Şekil 8' den aşağıdaki gibi türetilir.

$$X_{h_n} = x_{h_n} + \Delta x_n \quad (33)$$

$$Y_{h_n} = y_{h_n} + \Delta y_n \quad (34)$$

Yine Şekil 8' den \$\Delta x_n\$ ve \$\Delta y_n\$, için aşağıdaki ifadeler yazılabilir.

$$\Delta x_n = r_c \cdot \cos \lambda_n \quad (35)$$

$$\Delta y_n = r_c \cdot \sin \lambda_n \quad (36)$$

Daha sonra, (15) ve (16) denklemlerinin \$\beta_n\$ açısına göre türevleri alınırsa, aşağıdaki ifadeler yazılabilir.

$$\Delta y_n = r_c \cdot \sin \left[\tan^{-1} \left(-\frac{(R_\zeta + r_e) \cdot \sin \psi_n + (R_\zeta + r_e) \cdot \sin \left(\frac{R_\zeta + r_e}{r_e} \cdot \psi_n \right)}{(R_\zeta + r_e) \cdot \cos \psi_n - (R_\zeta + r_e) \cdot \cos \left(\frac{R_\zeta + r_e}{r_e} \cdot \psi_n \right)} \right) \right] \quad (37)$$

$$\frac{dx_{h_n}}{d\beta_n} = (R_\zeta - r_h) \cdot \cos \beta_n - (R_\zeta - r_h) \cdot \cos \left(\frac{R_\zeta - r_h}{r_h} \cdot \beta_n \right) \quad (38)$$

Şekil 8' den teğetin eğimi için aşağıdaki eşitlik yazılabilir.

$$m_t = \tan \gamma_n = \frac{dyh_n}{dxh_n} \quad (39)$$

$$m_t \cdot m_n = -1 \quad (40)$$

(39) ve (40) ifadelerinden normalin eğimi için aşağıdaki ise eşitlik yazılabilir.

$$m_n = \tan \lambda_n = -\frac{dxh_n}{dyh_n} \quad (41)$$

(41) ifadesinden λ_n açısı için, aşağıdaki ifade yazılabilir.

$$\lambda_n = \tan^{-1} \left(-\frac{dxh_n}{dyh_n} \right) \quad (42)$$

(37) ve (38) denklemleri, (42) ifadesinde yerlerine yazılırsa aşağıdaki ifade bulunur.

$$\lambda_n = \tan^{-1} \left(-\frac{-(R_\zeta - r_h) \cdot \sin \beta_n - (R_\zeta - r_h) \cdot \sin \left(\frac{R_\zeta - r_h}{r_h} \cdot \beta_n \right)}{(R_\zeta - r_h) \cdot \cos \beta_n - (R_\zeta - r_h) \cdot \cos \left(\frac{R_\zeta - r_h}{r_h} \cdot \beta_n \right)} \right) \quad (43)$$

(43) ifadesi de, (35) ve (36) denklemlerinde yazılır ise aşağıdaki ifadeler türetilebilir.

$$\Delta x_n = r_\zeta \cdot \cos \left[\tan^{-1} \left(-\frac{-(R_\zeta - r_h) \cdot \sin \beta_n - (R_\zeta - r_h) \cdot \sin \left(\frac{R_\zeta - r_h}{r_h} \cdot \beta_n \right)}{(R_\zeta - r_h) \cdot \cos \beta_n - (R_\zeta - r_h) \cdot \cos \left(\frac{R_\zeta - r_h}{r_h} \cdot \beta_n \right)} \right) \right] \quad (44)$$

$$\Delta y_n = r_\zeta \cdot \sin \left[\tan^{-1} \left(-\frac{-(R_\zeta - r_h) \cdot \sin \beta_n - (R_\zeta - r_h) \cdot \sin \left(\frac{R_\zeta - r_h}{r_h} \cdot \beta_n \right)}{(R_\zeta - r_h) \cdot \cos \beta_n - (R_\zeta - r_h) \cdot \cos \left(\frac{R_\zeta - r_h}{r_h} \cdot \beta_n \right)} \right) \right] \quad (45)$$

Sonuç olarak, (44) ve (45) ifadeleri, (33) ve (34) denklemlerine ilave edilirse hiposikloid profil için takım yolu denklemleri aşağıdaki gibi türetilir.

Yine bilindiği gibi teğet ve normalin eğimi arasındaki ilişki aşağıdaki gibidir.

$$Xh_n = xh_n + r_\zeta \cdot \cos \left[\tan^{-1} \left(-\frac{-(R_\zeta - r_h) \cdot \sin \beta_n - (R_\zeta - r_h) \cdot \sin \left(\frac{R_\zeta - r_h}{r_h} \cdot \beta_n \right)}{(R_\zeta - r_h) \cdot \cos \beta_n - (R_\zeta - r_h) \cdot \cos \left(\frac{R_\zeta - r_h}{r_h} \cdot \beta_n \right)} \right) \right] \quad (46)$$

$$Yh_n = yh_n + r_\zeta \cdot \sin \left[\tan^{-1} \left(-\frac{-(R_\zeta - r_h) \cdot \sin \beta_n - (R_\zeta - r_h) \cdot \sin \left(\frac{R_\zeta - r_h}{r_h} \cdot \beta_n \right)}{(R_\zeta - r_h) \cdot \cos \beta_n - (R_\zeta - r_h) \cdot \cos \left(\frac{R_\zeta - r_h}{r_h} \cdot \beta_n \right)} \right) \right] \quad (47)$$

$$Zh_n = H_{\max} \quad (\text{sabit}) \quad (48)$$

2.4. Diş profillerinin döndürülmesi

Parmak freze, (30), (31), (32), (46), (47) ve (48) denklemlerine göre hareket ederse, sadece bir diş profili işlenir. Sikloidal dişlinin dişlerini işleyebilmek için, bu diş profilinin X-Y düzleminde sikloidal dişlinin diş sayısı kadar döndürülmesi gerekmektedir. Bu işlem için matematiksel ifadeler, sikloidal dişlinin episikloid ve hiposikloid profillerini oluşturan açılar dikkate alınarak matris formunda, sırası ile aşağıda sunulmuştur.

$$\begin{bmatrix} X_E \\ Y_E \\ Z_E \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi & -\sin \phi & 0 \\ \sin \phi & \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{E_n} \\ Y_{E_n} \\ Z_{E_n} \end{bmatrix} \quad (49)$$

Geliştirilen CAM programında, (49) denkleminde göre episikloid profil işlenip bitirildiği zaman ϕ açısı, $\phi = \phi + \psi_{\max}$ değerine ulaşır. Daha sonra, CAM programında hiposikloid profil (50) denklemi kullanılarak işlenir.

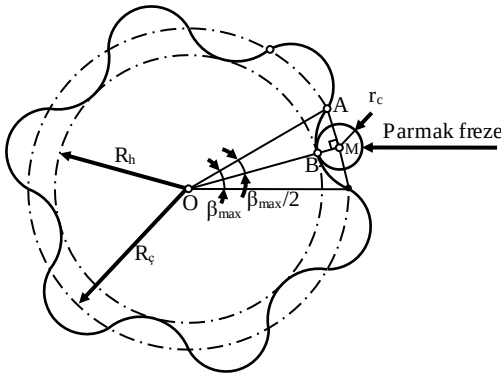
$$\begin{bmatrix} X_H \\ Y_H \\ Z_H \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi & -\sin \phi & 0 \\ \sin \phi & \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{H_n} \\ Y_{H_n} \\ Z_{H_n} \end{bmatrix} \quad (50)$$

Bu işlem sonucunda, sikloidal dişlinin episikloid profili ve hiposikloid profili bitirilmiş olur. Bu durumda ϕ açısı, $\phi = \phi + \beta_{\max}$ değerine ulaşır. Bu işlemler, sikloidal dişlinin diş sayısı

kadar tekrarlanır. Burada ϕ açısı, β_n ve ψ_n açılarındaki değişimlere göre oluşan açıdır.

3. CNC Frezede Sikloidal Dişlinin İşlenmesi İçin Parmak Frezenin Seçimi

Bu çalışmada, sikloidal dişlileri işlemek için parmak frezenin seçilmesinde, sikloidal dişlinin diş dibi profili dikkate alındı (Şekil 9).



Şekil 9. Dış dibine göre takımın konumu
(üst görünüş)

Maksimum takım yarıçapının belirlenebilmesi için, Şekil 9’ daki OAM üçgeninden aşağıdaki ifade yazılabilir.

$$R_{\zeta}^2 = (AM)^2 + (R_h + r_c)^2 \quad (51)$$

(51) denklemindeki R_{φ} ve R_h için sırası ile, $R_{\varphi}=(r_e+r_h).N$ ve $R_h=R_{\varphi}-2r_h$ ifadeleri kullanılabilir [14]. Yine Şekil 9' dan AM uzunluğu için aşağıdaki ifade yazılabilir.

$$AM = R_{\zeta} \cdot \sin \frac{\beta_{\max}}{2} \quad (52)$$

(52) ifadesi (51) ifadesinde yazılır ve bu denklem düzenlenirse, takım yarıçapı için aşağıdaki ifade kullanılabilir.

$$r_{c_{\max}} \leq N.(r_e + r_h). \left[\sqrt{1 - \left[\frac{\sin \frac{r_h \cdot 180}{(r_e + r_h) \cdot N}} \right]^2} - 1 \right] + 2.r_h \quad (53)$$

Sonuç olarak, piyasada kullanılan en küçük çaplı kesici çapının 2 mm olduğu da dikkate

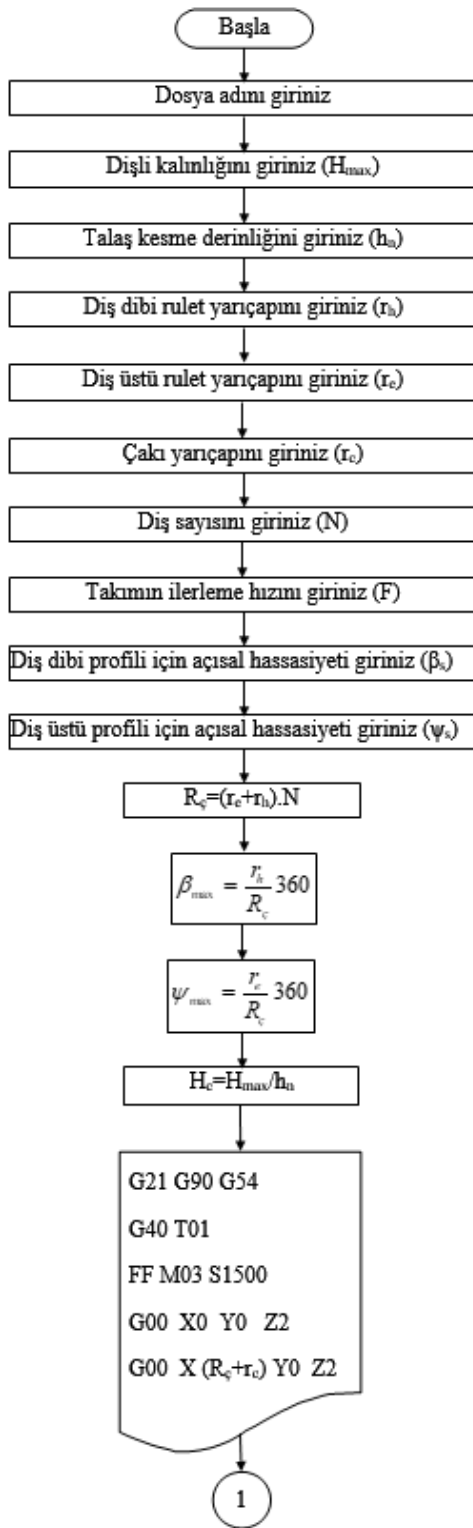
alınırsa, parmak frezenin seçimi için aşağıdaki ifade kullanılabilir.

$$1 \leq r_c \leq r_{c_{\max}} \quad (54)$$

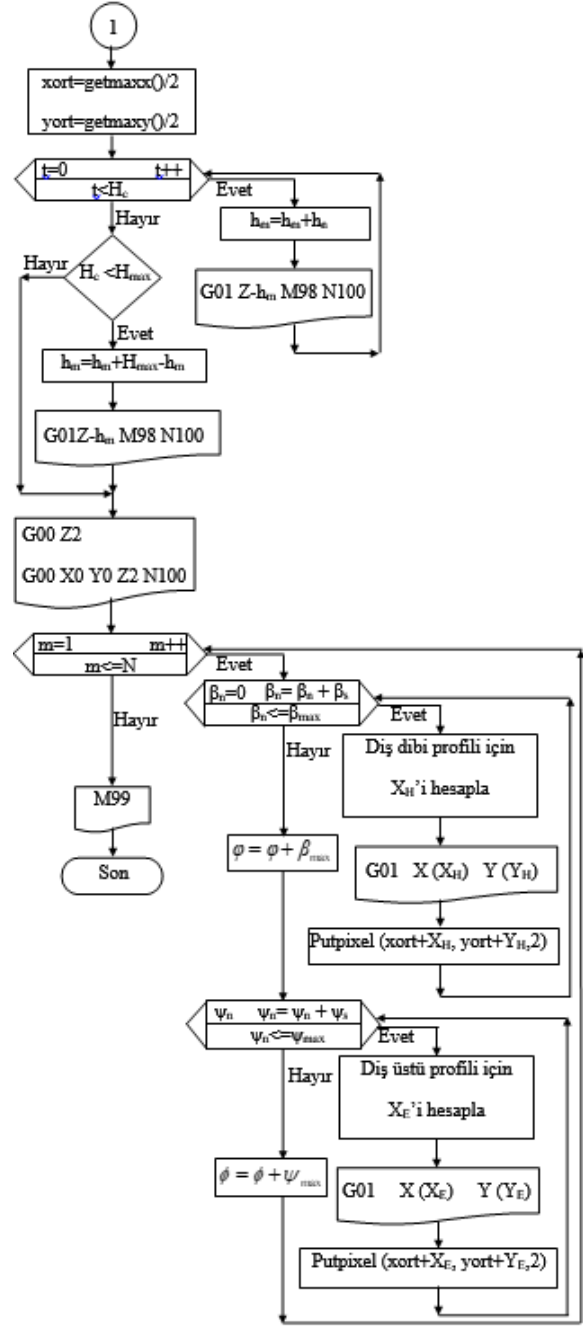
4. Sikloidal Dişli İmalatı İçin Cam Programı Algoritması

Sikloidal dişliyi CNC frezede işleyebilmek için imalat kodlarının türetilmesinde C++ dili kullanılmıştır. Bu programda sikloidal dişlinin CAM kodları C++ programı içerisinde açılan bir dosyaya yazdırılmıştır. CAM kodlarının türetilmesinde ise standart ISO (G ve M) kodları kullanılmıştır. Hazırlanan bu programda, sikloidal dişlinin CAD modeli sikloidal dişlinin tasarım parametrelerine göre oluşturulmuştur. Bu programın algoritması Şekil 10 da verilmiştir [21].

Bu algoritma h_n , ψ_s ve β_s gibi üç hassasiyet değerine göre çalışmaktadır. Programda h_n için girilen değerler, parmak frezinin dışlıy işlerken talaş kesme yüksekliğini ifade eder. ψ_s (derece) ve β_s (derece) için girilen değerler ise, sırası ile dışlının episikloid ve hiposikloid eğrilerini işleme doğruluğunu (hassasiyetini) ifade eder (Şekil 10).



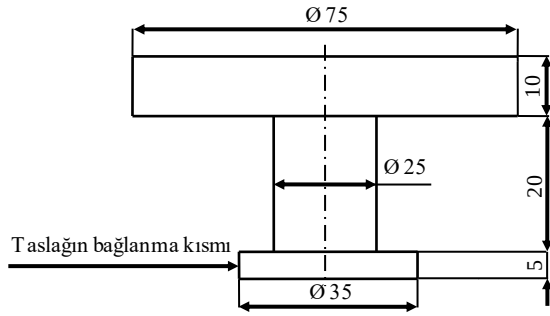
Şekil 10. CAM kodlarını türetmek için kullanılan algoritma



Şekil 11. (Algoritmanın sonu)

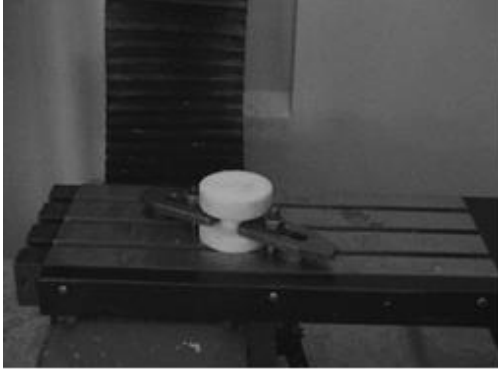
4.1. Taslağı CNC freze tezgâhına bağlanması

Dişli taslağının malzemesi, polyamid türü plastik bir malzemeden seçildi. Daha sonra, bu malzeme işlenmesi düşünülen dişlinin boyutlarına uygun olarak klasik bir torna tezgâhında işlenerek dişli taslağı haline getirildi (Şekil 12).



Şekil 12. Sikloidal dişli taslağı ve ölçüleri

Daha sonra, dişli taslağı CNC freze tezgâhının tablasına Şekil 13 deki gibi bağlandı.



Şekil 13. Dişli taslağının CNC frezeze bağlanması

4.2. Sikloidal dişlinin işlenmesi

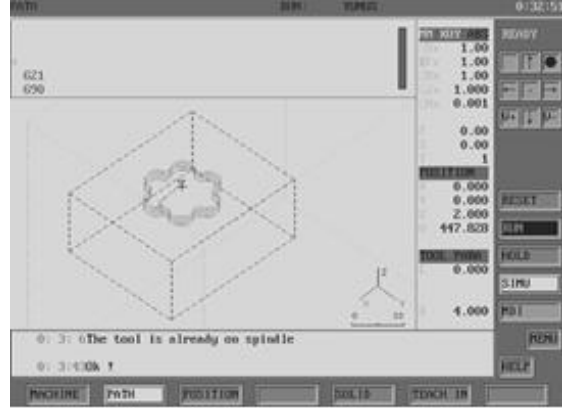
CNC frezede işlenmesi düşünülen sikloidal dişlinin tasarım parametreleri Tablo 1’ de verildi. Dişliyi işlemek için, takım kesme hızı 70 m/dak ve devir sayısı da 1500 dev/dak olarak seçildi. Geliştirilen C++ programı, bu tasarım ve işleme parametrelerine göre çalıştırıldı ve çift ruletli bir sikloidal dişlinin CAD modeli C++ grafik ortamında oluşturuldu. Programda, bir taraftan sikloidal dişlinin CAD modeli oluşturulurken, diğer taraftan da bu CAD modeline göre dişlinin CAM kodları, bir dosya içerisine yazdırıldı. Bu CAM kodlarına göre, dişlinin Dyna 4M CNC programında simülasyonu yapıldı (Şekil 14). Daha sonra, bu program kullanılarak farklı tasarım parametrelerine göre Dyna 4M CNC freze tezgâhında çeşitli sikloidal dişliler üretildi (Şekil 15).

Bu dişlilerin diş profilinin üzerindeki ölçümler 0.01 hassasiyetli Cadar marka bir dijital kumpas ile ölçüldü. Bu ölçüm sonuçları ve

literatürde [14] verilen formüller kullanılarak hesaplanan teorik değerler Tablo 2’ de verildi.

Tablo 1. Dişlinin tasarım parametreleri

H_{max} (mm)	N	r_h (mm)	r_e (mm)	β_n	ψ_n	r_c (mm)	h_n (mm)
12	6	1.65	2.1	0.1	0.1	2	3



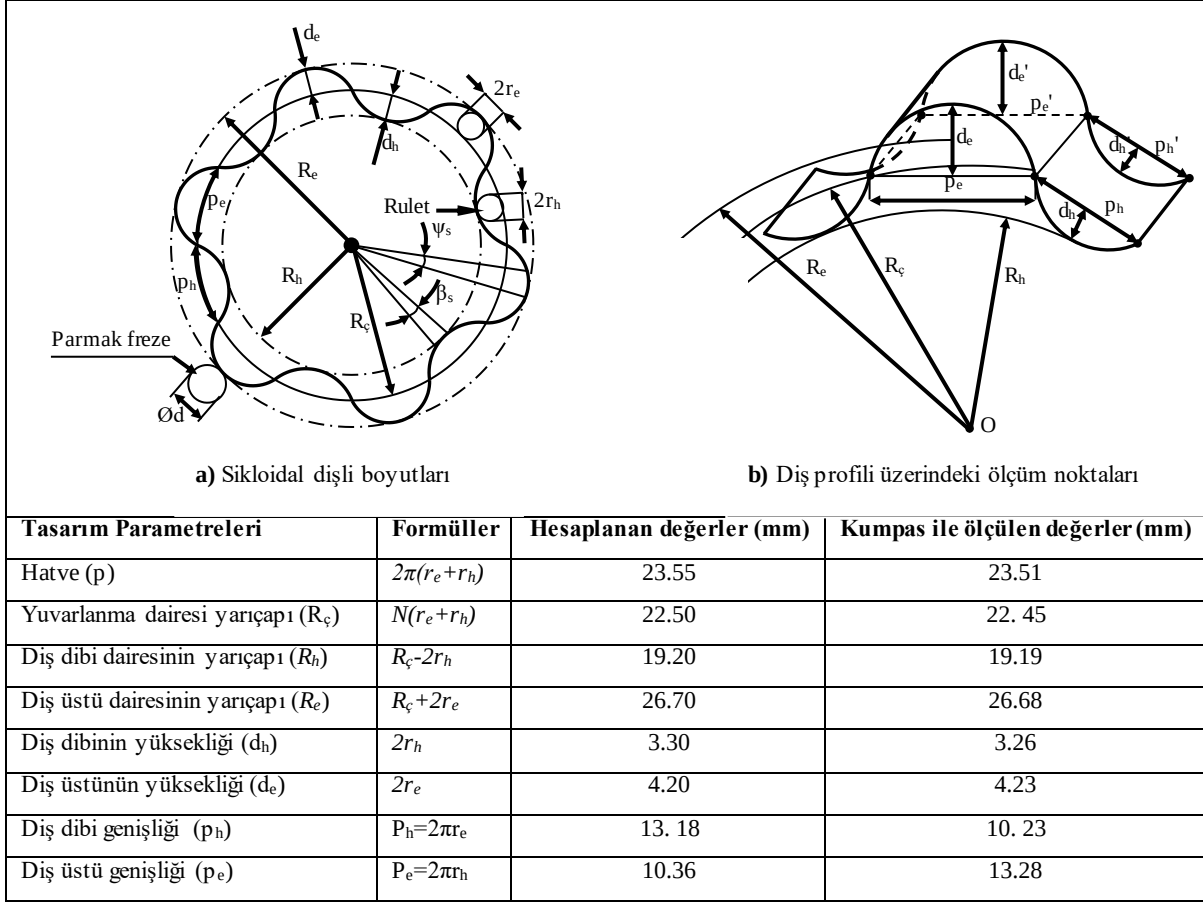
Şekil 14. Dişlinin CNC programında simülasyonu



Şekil 15. İmal edilen sikloidal dişliler

5. Sonuçlar ve Tartışma

Bu çalışmada, sikloidal dişliler klasik imalat yöntemlerinden farklı olarak CNC freze tezgâhında parmak freze ile işlendi. Bu şekilde bir imalat için radyal kesme yöntemi olarak tanımlanan bir yöntem kullanıldı (Şekil 3 ve 4). Bu yöntemde, sikloidal dişlileri işlemek için özel tezgâh, kesici ve yardımcı aperlara ihtiyaç kalmadı (Şekil 2).

Tablo 2. Çift ruletli sikloidal dişlilerin boyutlandırılması ve diş profil ölçüm noktaları

Makalede, bu yöntemle göre dişlileri işlemek için genel bir imalat programı geliştirildi. Bu program kullanılarak dişliler farklı işleme hassasiyetinde ve farklı diş sayılarında imal edildi (Şekil 14). İmal edilen bu dişlilerin diş profili üzerindeki ölçümler ile bu ölçüm noktaları için hesaplanan teorik değerler Tablo 2’ de verildi. Bu sonuçlara göre, sikloidal dişlilerin dik işlem merkezli CNC freze tezgâhında işlenebilecekleri görüldü. Geliştirilen CAM programı, β_s , ψ_s ve h_n gibi üç hassasiyet değerine göre çalışmaktadır. Programda girilen β_s verisi diş dibi profilini ve ψ_s için girilen datalar ise diş üstü profilinin işleme hassasiyetini belirler. Yine h_n için girilen değerler de, dişlinin Z eksenı boyunca talaş kesme kalınlığını ifade eder. Bu değerlerin programda çok küçük girilmesi halinde, diş profilinin hassasiyeti artmaktadır. Ancak bu değerlerin büyük seçilmesi halinde ise, diş profilinin

hassasiyeti azalmaktadır. Bu çalışmada, mevcut CAD/CAM yazılımlarında kullanılan yaklaşık eğri oluşturma yöntemleri kullanılmadı. Çünkü bu yöntemlerin kullanılması durumunda, gerçekte sikloid eğri olmayan, sadece noktalar arasından geçen en uygun eğri oluşturulmaktadır. Bu durum kremayer kesici ile diş profili oluşturma prensiplerine uygun düşmediği için, makalede yaklaşık eğri oluşturma yöntemleri kullanılarak CAM kodları oluşturulmadı. Tüm bunlarla beraber, sikloidal dişlileri CNC freze tezgâhlarında işleye bilmek için parmak freze çapının belirlenmesi de önemli bir durumdur. Parmak freze seçilirken, diş profilini oluşturan rulet çapı dikkate alındı. Çünkü hiposikloidal ve episikloidal profillerinin oluşumu ruletin çapına bağlı olarak değişmektedir (Şekil 14).

Bu makalede, sikloidal dişlileri işlemek için uygun olan parmak frezenin seçimi için (53) denklemi türetildi. Bu denklem kullanılarak

hesaplanan takım çapının 2 mm den küçük olması halinde, bu dişliler CNC freze tezgâhlarında işlenememektedir. Çünkü 2 mm den daha küçük çaplı parmak freze piyasalarda bulunmamaktadır. Ek olarak parmak frezenin ömrü, geleneksel işleme yönteminde kullanılan kremayer kesicinin ömrüne göre daha az olacaktır. Çünkü kremayer kesici bu dişliyi işlerken takımın bütün kesici yüzeyleri kullanılmaktadır (Şekil 2). Oysa makalede belirlenen kesme yöntemine göre, parmak frezenin sadece taban kenarları kullanılmaktadır. Ancak parmak frezelerin fiyatları kremayer takımların fiyatına göre daha ucuzdur. Yine parmak frezelerin mukavemetleri kremayer takımlara göre daha düşüktür. Bu sebepten dolayı CNC freze tezgâhlarında sikloidal dişlilerin işlenmesi durumunda, talaş kesme yüksekliği, ilerleme hızı ve devri gibi işleme parametreleri seçilirken, parmak frezenin çapı ve dişli malzemesinin sertliği dikkate alınmalıdır. Kremayer takımın mukavemeti parmak frezeyle göre daha yüksek olduğu için, bu kesicilerle sikloidal dişliler işlenirken, takım ilerleme hızı ve talaş kesme derinlikleri çok daha büyük değerlerde verilebilir. Bu değerlerin büyük olması, sikloidal dişlilerin kremayer takımlarla çok daha kısa sürelerde imal edilebileceklerini göstermektedir.

Sonuç olarak, bu makalede geliştirilen CAM programı ile 2 mm ve daha üzerindeki rulet değerlerine sahip olan her türlü standart ve standart dışı ölçülerde sikloidal dişlilerin genel amaçlı dik işlem merkezli CNC freze tezgâhlarında işlenebilecekleri görüldü.

6. Genel Sonuçlar

Bu çalışma sonunda aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

1. Geliştirilen programla, standart ve standart olmayan sikloidal dişlilerin imal edilebileceği görüldü. Ancak klasik yöntemlerde, sadece standart olan sikloidal dişliler üretilmektedir.

2. Sikloidal dişlileri imal etmek için klasik yöntemlerde kullanılan özel kesici, takım tezgâhları ve aparatlara gerek kalmadı.

3. Makalede, sikloidal diş profillerinin kesilme hassasiyetinin 0,001 seviyesine kadar çıkabileceği, ancak bu durumda dişlinin imalat süresinin çok uzun olacağı görüldü.

4. Rulet çapının 2 mm den daha küçük olması durumunda, bu tür sikloidal dişlilerin imal edilemeyeceği görüldü.

5. Dişliyi parmak frezeyle kesmenin daha uzun sürede olacağı, kremayer kesiciyle kesmenin ise daha kısa sürede olacağı görüldü.

7. Kaynaklar

1. Shigley, J. E. (1969). Kinematic Analysis of Mechanisms. *McGraw-Hill, Inc.*, New York.
2. Dooner, D. and Seireg, A. (1995). The Kinematic Geometry of Gearing. Wiley, New York.
3. Kudriavcev, V. (1966). Planetaryje peradici, Masinostroenije, Moskva-Leningrad.
4. Lehmann M. (1976). Berechnung und Messung der Kräfte in einen Zykloiden-Kurvenscheiben-Getriebe, Dissertation der Technischen Universität, München.
5. Müller H. W. (1971). Die Umlaufgetriebe, Springer verlog, Berlin.
6. Müller L. (1983). Przekładnie obiegowe, PWN, Warszawa.
7. Akkurt, M. (2000). Makina Elemanları, İstanbul.
8. Hamilton, H. M. and Fred, W. O. (1963). Mechanisms and Dynamics of Machinery. John Wiley and Sons, Inc., second edition. New York, London.
9. Demenego, A., Vecchiato, D., Litvin, F. L., Nervegna, N. and Manco, S. (2002). Design and simulation of meshing of a cycloidal pump. *Mechanism and Machine Theory*, **37**, 311-332.
10. Ranganathan, G., Hillson Samuel Raj, T. and Monhan Ram, P.V. (2003). Wear characterisation of small PM rotors and oil pump bearing. *Tribology International*, **37**, 1-9.
11. Malhotra, S. K. and Parameswaran, M. A. (1983). Analysis of a cycloid speed reducer. *Mechanism and Machine Theory*, **18**(6), 491-499.
12. Maximov, J. and Hristov, H. (2005). Machining of hypocycloidal surfaces by adding rotations around paralel axes, Part I: Kinematics of The Method and Rational Field of Application. *Trakya Univ J Sci*, **6**(1), 1-11.
13. Maximov, J. And Hriztov, H. (2005). Machining of hypocycloidal surfaces by adding rotations around paralel axes, Part II: Geometry of The Body of The Tool. *Trakya Univ J Sci*, **6**(1), 13-18.
14. Litvin, F. L., Demengo, A. and Vecchiato, D. (2001). Formation by branches of envelope to parametric families of surfaces and curves. *Computer method in Applied Mechanics and Engineering*, **190**, 4587-4608.

15. Sahraibman, S. M. (1989). A statistical survey of gear-cutting operations in various production model. *Sovient Engineering Research*, **60**(2), 29-31.
16. Elber, G. and Cohen, E. (1993). Proc 2 Symp Solid Model Appl. *In Publ by ACM*, 419-428.
17. Zhang, L. P., Fuh, J. Y. H. and Nee, A. Y. C. (2003). Tool path regeneration for mold design modification. *Computer-Aided Design*, **35**, 813-823.
18. Özel, C., İnan, A., Özler, L., (2005). An investigation on manufacturing of the straight bevel gear using end mill by CNC milling machine, *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transaction of the ASME*, vol. 127, 503-511.
19. Özel, C. (2012). A study on cutting errors in the tooth profiles of the spur gears manufactured in CNC milling machine. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **59**(1-4), 243-251.
20. Özel, C. (2011). Research of production times and cutting of the spur gears by end mill in CNC milling machine. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **54**(1-4), 203-213.
21. Özel, C. and Ortaç, Y. (2016). A study on cutting errors in tooth profiles of cycloidal gears manufactured in CNC milling machine. *Int. J. Materials and Product Technology*, **53**(1), 42-60.

Yarım Etkili, Tek Etkili ve Çift Etkili Absorpsiyonlu Soğutma Çevrimlerin Ekserji Analizi

Rabi KARAALİ¹

¹Bayburt Üniversitesi, Müh. Fak., Makina Mühendisliği Böl., 69000 Bayburt
(rabikar@gmail.com)

(Geliş/Received: 30.03.2017; Kabul/Accepted: 19.07.2017)

Özet

Bu çalışmada yarım, tek ve çift etkili absorpsiyonlu sistemlerin ekserji analizleri yapılmış ve birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Lityum bromid-su çözeltisinin termodinamik özelliklerinin hesabı için yazar tarafından FORTRAN dilinde bir program yazılmış ve ekserji analizinde kullanılmıştır. Soğutma etkinlik katsayısı (COP) ve ekserjetik soğutma etkinlik katsayısı (ECOP) çift etkili absorpsiyonlu sistemde diğer iki sisteme göre daha yüksek bulunmuştur. Çift etkili absorpsiyonlu sistemde COP ve ECOP sırasıyla 1.196 ve 0.284 bulunurken, tek etkili sistemde COP ve ECOP sırasıyla 0.68 ve 0.254 bulunmuştur. Yarım etkili sistemde ise COP ve ECOP sırasıyla 0.455 ve 0.24 bulunmuştur. Sistemleri oluşturan cihazların ekserji kayıpları hesaplanmıştır. Ekserji kayıplarının çoğunluğunun evaporator ve absorberde olduğu görülmüştür. Her üç sistem için evaporator ve absorberin performansının önemli olduğu görülmüştür. Evaporator ve absorberin performansının geliştirilmesinin ve daha iyi tasarlanmasının her üç sistemin performansını ve çalışma koşullarını olumlu etkileyecektir.

Anahtar Kelimeler: Soğutma, Absorpsiyon, Yarım-Tek-Çift etkili, ECOP.

Exergy Analyses of Half-Effect, Single-Effect and Double-Effect Absorption Cooling Cycles

Abstract

This work presents exergy and energy analysis of a half effect parallel flow, single effect and double effect absorption systems for comparison. For the thermodynamic properties of lithium bromide-water solutions a computer program is developed by the author in FORTRAN codes for the energy and exergy analysis. It is found that the coefficient performance (COP) and the exergetic coefficient performance (ECOP) of the double effect parallel flow absorption systems are higher than the single effect and the half effect cycles. For the double effect cycle COP and ECOP are found as 1.196 and 0.284, and for the single effect cycle COP and ECOP are found as 0.68 and 0.254, respectively. For the half effect cycle COP and ECOP are found as 0.455 and 0.24, respectively. The exergy loss is calculated for each component. Most of the irreversibilities are found in the evaporator and in the absorber. It is concluded that the performance of the absorber and the evaporator is crucial for the three cycles. Improving and better design of the evaporator and the absorber will directly affect positively and improve the performance and the working conditions of the three cycles.

Keywords: Cooling, Absorption, Half-Single-Double effect, ECOP.

1. Giriş

Endüstride fosil yakıtların kullanımı ile elde edilen ısı enerjisinin bir kısmı atılmaktadır. Bu atık ısının bir kısmı kullanılarak absorpsiyonlu soğutma sistemleri çalıştırılabilir. Binaların ve endüstrinin tüm dünyada artan soğutma talebi düşük sıcaklıkta ısı enerjisi ile çalışan absorpsiyonlu soğutma sistemlerine ilgiyi

artırmıştır. Soğutma talebine ilginin artmasının sebebi daha yüksek yaşam standartlarına, rahatlık ve konfora olan talepten kaynaklanmakta olup, bu sebeplerden binaların ısı yükleri de artmıştır. Isı, güç ve soğutmanın aynı anda üretildiği sistemlerde absorpsiyonlu soğutma gerekli bir cihazdır. Absorpsiyonlu soğutma teknolojisi çevre dostu ve atık ısı enerjisi geri kazanımı sağlayan bir teknolojidir.

Soğutma için harcanan güç düşük sıcaklıktaki atık ısı, jeotermal veya güneş enerjisi kullanımı ile azaltılabilir. Absorpsiyonlu soğutma teknolojisinin daha birçok üstün özellikleri vardır, ancak soğutma piyasasına buhar sıkıştırmalı (kompresörlü) soğutma teknolojisi egemendir.

Absorpsiyonlu soğutma sistemlerinde kullanılabilir yaklaşık 40 çeşit soğutucu çözelti ve yaklaşık 200 çeşit emici (absorbent) bileşik mevcuttur, ancak en çok su/ NH_3 ve LiBr/su çözeltileri iş akışkanı olarak kullanılmaktadır. 0 °C'nin üzerindeki evaporator sıcaklıklarında, $\text{LiBr-H}_2\text{O}$ çözeltisinin verimi diğer çözeltilere göre daha yüksektir. Ancak kristalizasyon oluşum tehlikesi denilen tuz oluşumu riski mevcut olup bu tehlike yüksek absorber sıcaklıklarında, makinenin içine hava kaçaklarında ve düşük çevre sıcaklıklarında ortaya çıkabilmektedir. Amonyak-lityum nitrat, amonyak-su ve diğer bazı çözeltiler 0 °C'nin altındaki evaporator sıcaklıklarında kullanma imkânı sunarlar. Bir absorpsiyonlu çevrimin COP'u üç dış sıcaklığa bağlıdır. Bunlar buharlaşma (evaporator), çevre ve verilen ısı enerjisinin (jeneratör) sıcaklığıdır. En iyi COP değerleri yönünden sıralama yapılırsa üç etkili en iyi, çift etkili daha az, tek etkili daha da az ve en kötü yarım etkili çevrimlerdir. Jeneratör sıcaklıkları üç etkili çevrimler için 150-200 °C, çift etkili çevrimler için 120-160 °C, tek etkili çevrimler için 80-130 °C ve yarım etkili çevrimler için 50-90 °C arasında olmalıdır. Çift etkili ve tek etkili absorpsiyonlu soğutma çevrimleri piyasada tutulmuş ve çok kullanılan çevrimlerdir. Bu dört çevrimin tasarımları ve birbirlerinden farkları literatürde bulunabilir [1, 2].

Hava soğutmalı çift etkili absorpsiyonlu soğutma sistemleri tek etkili ve yarım etkili çevrimlere göre daha verimli, daha esnek, soğutma kulesi ve suyla soğutma gerektirmeyen sistemler olup daha üstündürler. Çift etkili sistemlerde ısı kaynağı ile iki ayrı jeneratörde iki defa soğutucu akışkan buharı üretilmektedir. Çift etkili sistemlerin birçok değişik tasarımı mevcut olup en yaygın kullanılanları paralel bağlı ve seri bağlı olanlardır. Seri bağlıda akışkan çözelti ikiye bölünmeden her iki jeneratörden geçer. Paralel bağlıda ise akışkan çözeltisi yüksek

basıncılı ve düşük basıncılı jeneratörleri için ikiye bölünür. Soğutma kapasitesi yönünden seri tasarım paralelden daha iyidir, ancak paralel tasarımın COP'u daha yüksektir [1, 2].

Farshi ve diğ., çift etkili absorpsiyonlu soğutma sistemlerinin ekserji-ekonomik analizini yapmış ve minimum toplam maliyetlerin, düşük kondanser sıcaklıklarında ve yüksek evaporator sıcaklıklarında elde edildiğini bulmuştur [3]. Inzunza ve diğ., iş akışkanı $\text{H}_2\text{O/LiBr}$ olan tek etkili, yarım etkili ve seri ve ters bağlı çift etkili absorpsiyonlu soğutma sistemlerinin performanslarını karşılaştırmışlardır. 100 °C ve 110 °C jeneratör sıcaklıkları için tek etkilide COP 0.89, 55 °C üzerindeki jeneratör sıcaklıklarında yarım etkilide COP 0.44, değerlerinde bulmuşlardır. Çift etkilide ise COP 1.48 civarında olup, yarım etkili sistemi en iyi çalışan sistem olarak bulmuşlardır [4]. Inzunza ve diğ., başka bir çalışmalarında iş akışkanı $\text{NH}_3\text{-LiNO}_3$ olan tek etkili, yarım etkili ve seri ve ters bağlı çift etkili absorpsiyonlu soğutma sistemlerinin performanslarını karşılaştırmışlardır. Soğutucu akışkanı $\text{H}_2\text{O/LiBr}$ olan çevrimlerin COP değerleri soğutucu akışkanı $\text{NH}_3\text{-LiNO}_3$ olan çevrimlerden daha yüksek, ancak soğutucu akışkanı $\text{NH}_3\text{-LiNO}_3$ olan çevrimlerle evaporator sıcaklığı -50 °C civarına düşürülebilmektedir [5]. Talukdar ve Gogoi kombine güç ve soğutma üretiminde boylarin atık ısı ile çalışan çift etkili $\text{H}_2\text{O/LiBr}$ sisteminin ekserji analizini yapmışlardır. Güç çevrimi ile entegrasyonda çift etkili $\text{H}_2\text{O/LiBr}$ sisteminin tek etkili sistemden daha uygun ve daha iyi olduğunu bulmuşlardır [6].

Colorado ve Rivera konvansiyonel buhar sıkıştırmalı soğutma sistemi ile buhar sıkıştırmalı-absorpsiyonlu (kaskad) tek ve çift etkili soğutma sistemlerinin performanslarını karşılaştırmışlardır [7]. Kaskad çevrimin kompresör gücünde buhar sıkıştırmalı sisteme göre % 45 tasarruf sağladığını bulmuşlardır. Kaynaklı ve diğ., değişik ısı kaynakları ile çalışan çift etkili absorpsiyonlu soğutma sisteminin enerji ve ekserji analizlerini yapmışlardır. Çalışmalarında ısı kaynağının sıcaklığı yükseldikçe yüksek basınç jeneratörünün ekserji kaybı artmaktadır [8]. Avanesian ve Ameri tek ve çift etkili $\text{LiBr-H}_2\text{O}$ absorpsiyonlu soğutma sisteminin enerji, ekserji

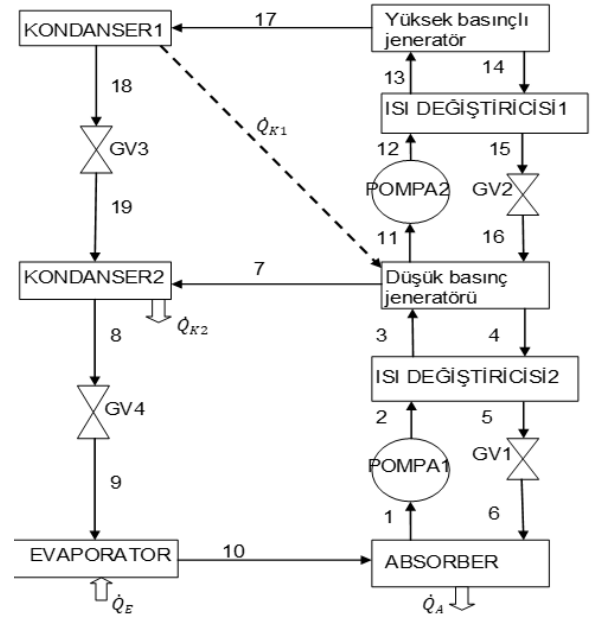
ve ekonomik analizlerini yapmış ve çift etkili sistemlerin tek etkililerden daha ekonomik olduğunu göstermişlerdir [9]. Bouaziz ve Lounissi güneş enerjili yeni çift etkili hibrit absorpsiyonlu soğutma sisteminin enerji ve ekserji araştırması adlı makalelerinde önerdikleri çevrimin konvansiyonel olanından daha yüksek COP değerine sahip olduğunu göstermişlerdir [10].

Bu çalışmanın amacı yarım etkili, tek etkili ve çift etkili absorpsiyonlu soğutma sistemlerinin tersinmezliklerini ve ekserjetik soğutma etkinlik katsayılarını (ECOP) araştırmak ve karşılaştırmaktır. Bu çalışmada incelenen üç çevrimin çalışma koşulları referans [1, 11]'den alınmıştır.

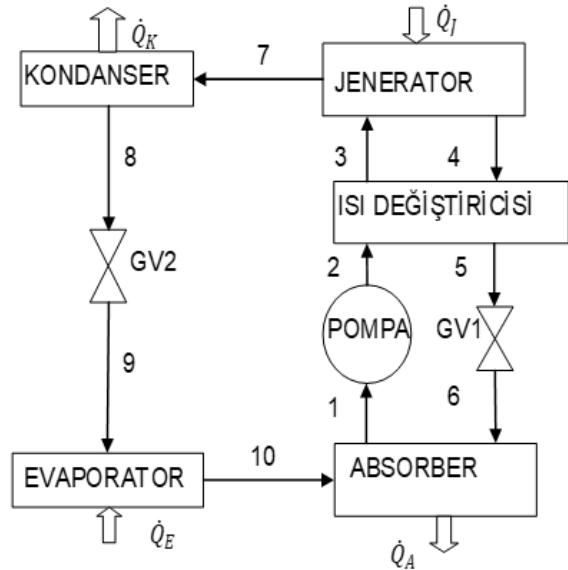
2. Materyal ve Metod

Çift etkili, tek etkili ve yarım etkili absorpsiyonlu soğutma sistemlerinin şematik diyagramları Şekil 1, 2 ve 3'te verilmiştir. Yarım etkili absorpsiyonlu soğutma sisteminde iki absorber, bir kondanser, iki jeneratör, bir evaporator, iki ısı değiştiricisi, iki pompa ve üç genişleme valfi mevcuttur. Tek etkili absorpsiyonlu soğutma sisteminde bir absorber, bir kondanser, bir jeneratör, bir evaporator, bir ısı değiştiricisi, bir pompa ve iki genişleme valfi mevcuttur.

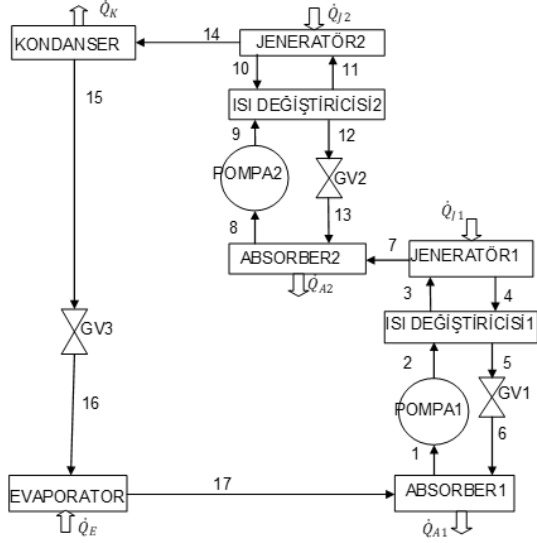
Çift etkili absorpsiyonlu soğutma sisteminde bir absorber, iki kondanser, iki jeneratör, bir evaporator, iki ısı değiştiricisi, iki pompa ve dört genişleme valfi mevcuttur. Çift etkili çevrimde çözelti pompa1'den pompalanarak ısı değiştiricisi2'den ısıtarak düşük basınçlı jeneratöre geçer. Düşük basınçlı jeneratör ısıyı kondanser1'den almakta olup pompa2 ile sıvı çözeltisi ısı değiştiricisi1'e pompalanır oradan da yüksek basınçlı jeneratöre geçer. Yüksek basınçlı jeneratörden çıkan buhar kondanser1'de yoğunur ve bu sırada ısıyı düşük basınçlı jeneratöre verir. Kondanser1'de yoğunan buhar kondanser2'de düşük basınçlı jeneratörden gelen buhar ile karışarak tamamen yoğunur. Daha sonra kondanser2'den çıkan sıvı su genişleme valfi4'te genişleyerek soğutma elde etmek üzere evaporatöre verilir.



Şekil 1. Çift etkili absorpsiyonlu soğutma



Şekil 2. Tek etkili absorpsiyonlu soğutma



Şekil 3. Yarım etkili absorpsiyonlu soğutma sistemi

Tek etkili çevrim bir soğutma çevrimi (7-10) ile $H_2O-LiBr$ çözelti çevriminden (1-6) oluşur. Jeneratörden elde edilen buhar kondanserde yoğunlaştırılarak sıvılaştırılır. Bu sıvı bir genleşme valfinde daha düşük basınca genişletilerek evaporatöre verilir. Evaporatörde soğutma elde

edilerek ısıran buhar absorbere verilir. Buhar burada $H_2O-LiBr$ çözeltisi ile karışarak ısısının bir kısmını atar. Absorberden fakir $H_2O-LiBr$ çözeltisi pompalanarak ısı değiştiricisinde ısıtır ve jeneratöre verilir, bu şekilde çevrim devam eder.

Yarım etkili çevrimde iki $H_2O-LiBr$ çözelti çevrimi vardır. Buhar jeneratör2'de üretilerek kondanserde yoğunlaştırılır ve genleşme valfi3'te basıncı düşürülerek evaporatöre gönderilir. Evaporatörde tamamen buharlaşarak ısıran H_2O buharı absorber1'de $H_2O-LiBr$ çözeltisi ile karışarak ısısının bir kısmını atar. Absorber1'deki fakir $H_2O-LiBr$ çözeltisi ısı değiştiricisi1'e pompalanır ve buradan ısıranak düşük basınçlı jeneratör1'e gelir. Jeneratör1'de suyun bir kısmı verilen ısısının etkisi ile buharlaşır ve buradan absorber2'ye geçer. Absorber2'de $H_2O-LiBr$ çözeltisine karışan buhar bir kısım ısısını atar. Absorber2'den pompalanan fakir $H_2O-LiBr$ çözeltisi bir ısı değiştiricisinde biraz daha ısıtılarak yüksek basınçlı jeneratör2'ye verilir.

Tablo 1. Tek etkili absorpsiyonlu soğutma sisteminin her bir cihazı ve tümü için kütle, enerji ve ekserji denklemleri [12, 13]

Cihaz	Kütle dengesi	Enerji dengesi	Ekserji denklemi
Absorber	$\dot{m}_6 + \dot{m}_{10} = \dot{m}_1$	$Q_A = \dot{m}_{10}h_{10} + \dot{m}_6h_6 - \dot{m}_1h_1$	$E_1 = \dot{m}_1(h_1 - h_0 - T_0(s_1 - s_0))$ $E_6 = \dot{m}_6(h_6 - h_0 - T_0(s_6 - s_0))$ $E_{10} = \dot{m}_{10}(h_{10} - h_0 - T_0(s_{10} - s_0))$
Pompa	$\dot{m}_1 = \dot{m}_2$	$W_{P1} = \dot{m}_1(h_2 - h_1)$	$E_2 = \dot{m}_2(h_2 - h_0 - T_0(s_2 - s_0))$
Isı değiştiricisi	$\dot{m}_2 = \dot{m}_3$ $\dot{m}_4 = \dot{m}_5$	$\dot{m}_2h_2 + \dot{m}_4h_4 = \dot{m}_3h_3 + \dot{m}_5h_5$	$E_3 = \dot{m}_3(h_3 - h_0 - T_0(s_3 - s_0))$ $E_4 = \dot{m}_4(h_4 - h_0 - T_0(s_4 - s_0))$ $E_5 = \dot{m}_5(h_5 - h_0 - T_0(s_5 - s_0))$
Genişleme valfi1	$\dot{m}_5 = \dot{m}_6$	$\dot{m}_5h_5 = \dot{m}_6h_6$	
Jeneratör	$\dot{m}_3 = \dot{m}_4 + \dot{m}_7$	$\dot{m}_3h_3 + Q_J = \dot{m}_4h_4 + \dot{m}_7h_7$	$E_7 = \dot{m}_7(h_7 - h_0 - T_0(s_7 - s_0))$
Kondanser	$\dot{m}_7 = \dot{m}_8$	$\dot{m}_7h_7 = \dot{m}_8h_8 + Q_K$	$E_8 = \dot{m}_8(h_8 - h_0 - T_0(s_8 - s_0))$
Genişleme valfi2	$\dot{m}_8 = \dot{m}_9$	$\dot{m}_8h_8 = \dot{m}_9h_9$	$E_9 = \dot{m}_9(h_9 - h_0 - T_0(s_9 - s_0))$
Evaporator	$\dot{m}_9 = \dot{m}_{10}$	$\dot{m}_9h_9 + Q_E = \dot{m}_{10}h_{10}$	
Tüm çevrim	$(\dot{Q}_A + \dot{Q}_K)_{çıkış} = (\dot{Q}_J + W_P + \dot{Q}_E)_{giren}$	$COP = \dot{Q}_E / (\dot{Q}_J + W_P)$ $W_P = \dot{m}_g(h_g - h_c) = \Delta P / \rho$ $\dot{E} = Q(1 - \frac{T_0}{T})$ $\dot{E}_{D,I} = \dot{E}_3 + \dot{E}_6 - \dot{E}_7 - \dot{E}_4$	$\dot{E}_{D,K} = \dot{E}_7 - \dot{E}_8 - \dot{E}_{C1}$ $\dot{E}_{D,I,D} = \dot{E}_2 + \dot{E}_4 - \dot{E}_3 - \dot{E}_5$ $\dot{E}_{D,E} = \dot{E}_9 + \dot{E}_E - \dot{E}_{10}$ $\dot{E}_{D,GV} = \dot{E}_g + \dot{E}_c$ $ECOP = \dot{E}_E / (W_{P,top} + \dot{E}_J)$

Bu çalışmada üç çevrimin termodinamik ve matematik modelleri ve termodinamik analizleri yapılarak aşağıda açıklanmıştır. Termodinamik analizde yapılan kabuller şunlardır: Borulardaki ve cihazlardaki basınç düşüşleri ihmal edilebilir,

çevrimler dengeli ve düzgün akışlı, kondanser çıkışındaki akışkan tamamen sıvı halde ve kondanser basıncında, pompalama işlemi adyabatik, basınç düşürücü valfler adyabatik, evaporatörden çıkan akışkan evaporator

basıncında doymuş buhar halinde, soğutucu akışkan saf su, cihazlardan çevreye olan ısı kaybı ihmal edilebilir ve Jeneratör ve absorberden çıkan çözelti beklenen sıcaklık ve basınçta denge halinde doymuş olarak kabul edilmiştir. Çevrimlere kütle giriş çıkışı olmadığından akışların kimyasal ekserjileri dikkate alınmamış, sadece fiziksel ekserjileri hesaba katılmıştır. Tek etkili absorpsiyonlu soğutma çevriminde kullanılan denklemler her bir cihaz ve tüm çevrim için Tablo 1’de verilmiştir.

3. Sonuçlar

Akışların entalpi ve entropi değerlerini hesaplamak için yazar tarafından FORTRAN dilinde bilgisayar program yazılmış ve

kullanılmıştır. Akışların entalpi ve entropi değerlerini hesaplamak için kullanılan denklemler referans [14, 15]’ten alınmıştır. Referans hal değerleri % 50 konsantrasyonlu $H_2O-LiBr$, 100 kPa basınç ve 25 °C sıcaklık için $h_0=49.2$ kJ/kg ve $s_0=0.1867$ kJ/kgK olarak alınmıştır. Tablo 2’de her bir cihaz için ve tüm çift etkili paralel akışlı çevrim için enerji, ekserji, kayıp ekserji, COP, ECOP, ekserji ve enerji denge ve değerleri verilmiştir. Karşılaştırma için her bir çevrime verilen ısı enerjisi her çevrim için farklı sıcaklıklarda olmak üzere 4000 kW’tır.

Tablo 3’te tek etkili çevrim ve Tablo 4’te yarım etkili çevrim için enerji, ekserji, kayıp ekserji, COP, ECOP, ekserji ve enerji denge ve değerleri her bir cihaz ve tüm çevrim verilmiştir.

Tablo 2. Çift etkili paralel akışlı çevrimin her bir cihazı ve tümü için enerji, ekserji, kayıp ekserji, COP, ECOP, ekserji ve enerji denge ve değerleri

Absorber ısı enerjisi- ekserji kaybı	$Q_A = 6326$ kW, $E_A = E_{D,A} = 492$ kW
Kondanser1 ısı enerjisi- ekserjisi -- ekserji kaybı	$Q_{K1} = 2325$ kW, $E_{K1} = 470.5$ kW, $(E_{D,DBJ} + E_{D,K1}) = 172$ kW,
Kondanser2 ısı enerjisi- ekserjisi -- ekserji kaybı	$Q_{K2} = 2459$ kW, $E_{K2} = E_{D,K2} = 193$ kW
Evaporator ısı enerjisi- ekserjisi	$Q_E = 4782$ kW, $E_E = 343$ kW, $E_{D,E} = 687$ kW
Yüksek basınçlı jeneratör ısı enerjisi- ekserjisi	$Q_{YBJ} = 4000$ kW, $E_{YBJ} = 1209$ kW
Düşük basınçlı jeneratör ısı enerjisi- ekserjisi -ekserji kaybı	$Q_{DBJ} = Q_{K1} = 2780$ kW, $E_{DBJ} = 364$ kW, $(E_{D,DBJ} + E_{D,K1}) = 203$ kW
COP	1.196
ECOP	0.284
Giren Enerji=Çıkan Enerji $\rightarrow (Q_{YBJ} + Q_E = Q_A + Q_{K2}) \rightarrow (4000 + 4782 = 6326 + 2459) \rightarrow 8782 \approx 8785$	
Tüm çevrim(giren ekserji $(E_{TÜM} = E_{YBJ} + E_E = 1209 + 343 = 1552)$	
Tüm çevrim (giren ekserji = çıkan ekserji = kayıp + tersinmezlik)	
$(E_{D,TÜM} = (E_{D,DBJ} + E_{D,K1}) + E_{D,A} + E_{D,K2} + E_{D,E} + E_{D,diğerleri} = 172 + 492 + 193 + 687 = 1544 \approx 1552 = \text{giren ekserji})$	
$Hata = (1552 - 1544) / 1552 = 0.005$	

Table 3. Tek etkili paralel akışlı çevrimin her bir cihazı ve tümü için enerji, ekserji, kayıp ekserji, COP, ECOP, ekserji ve enerji denge ve değerleri

Absorber ısı enerjisi- ekserji kaybı	$Q_A = 3780$ kW, $E_A = E_{D,A} + E_{A,kayıp} = 245$ kW,
Kondanser ısı enerjisi- ekserjisi- ekserji kaybı	$Q_K = 2941$ kW, $E_{K,kayıp} + E_{D,K} = 198$ kW
Evaporator ısı enerjisi- ekserjisi	$Q_E = 2720.7$ kW, $E_E = 229.3$ kW, $E_{D,E} = 422.7$ kW
Jeneratör ısı enerjisi- ekserjisi	$Q_J = 4000$ kW, $E_J = 905$ kW, $E_{D,J} = 261.2$ kW
COP	0.68
ECOP	0.254
Giren Enerji=Çıkan Enerji $\rightarrow (Q_J + Q_E = Q_A + Q_K) \rightarrow (4000 + 2720.7 = 3780 + 2941) \rightarrow 6720.7 = 6721$	
Tüm Çevrim (giren ekserji $(E_{TÜM} = E_J + E_E = 905 + 229.3 = 1134.3)$	
Tüm Çevrim (giren ekserji = çıkan ekserji)	
$(E_{D,TÜM} = E_{D,K} + E_{D,A} + E_{D,J} + E_{D,E} = 198 + 245 + 261.2 + 422.7 = 1126.9)$	
giren ekserji = çıkan ekserji $\rightarrow 1134.3 \approx 1126.9$	
$Hata = (1134.3 - 1126.9) / 1134.3 = 0.006$	

Bir soğutma sistemi için soğutma etkenlik katsayısı (COP) ve ekserjetik soğutma etkenlik katsayısı (ECOP) göz önüne alınması gereken en önemli değerlendirme kriterleridir. Yukarıda

verilen tablolardan görüldüğü gibi çift etkili çevrimin COP ve ECOP değerleri sırasıyla 1.196 ve 0.284 olup üç çevrim arasındaki en yüksek değerlerdir. Tek etkili çevrimin COP ve ECOP

değerleri sırasıyla 0.68 ve 0.254 olup, yarım etkili çevrimin COP ve ECOP değerleri sırasıyla 0.455 ve 0.24 civarındadır. Verilen ısı enerjisinin sıcaklığı çift etkili çevrimde 175 °C, tek etkili çevrimde 105 °C ve yarım etkili çevrimde 50 °C civarındadır. Buradan da görüleceği gibi absorpsiyonlu soğutma çevrimlerinde ısı kaynağının sıcaklığı arttıkça COP ve ECOP değerleri de artmaktadır.

En çok ekserji yıkımı ve kaybı her üç çevrimde de evaporatörlerde ortaya çıkmaktadır. Ekserji yıkımında ve kaybında absorberler ikinci sırada gelmektedir. Ekserji yıkım ve kaybının çoğunluğu bu iki cihazda olmaktadır. Isı değiştiricilerinde, pompalarda ve genleşme valflerindeki ısı kaybı ve yıkımı ihmal edilebilecek seviyededir.

Tablo 4. Yarım etkili paralel akışlı çevrimin her bir cihazı ve tümü için enerji, ekserji, kayıp ekserji, COP, ECOP, ekserji ve enerji denge ve değerleri

Absorber1 ısı enerjisi- ekserji kaybı	$Q_{A1} = 2001 \text{ kW}$, $E_{A1} = E_{D,A1} + E_{A1,kayıp} = 76.4$
Jeneratör1 ısı enerjisi- ekserjisi	$Q_{J1} = 2061 \text{ kW}$, $E_{J1} = 337.8 \text{ kW}$
Absorber2 ısı enerjisi- ekserji kaybı	$Q_{A2} = 1933 \text{ kW}$, $E_{A2} = E_{D,A2} + E_{A2,kayıp} = 239.1 \text{ kW}$
Jeneratör2 ısı enerjisi- ekserjisi	$Q_{J2} = 1939 \text{ kW}$, $E_{J2} = 150.5 \text{ kW}$
Kondenser ısı enerjisi- ekserjisi - ekserji kaybı	$Q_K = 1879.7 \text{ kW}$, $E_K = E_{K,kayıp} + E_{D,K} = 46 \text{ kW}$
Evaporator ısı enerjisi- ekserjisi	$Q_E = 1818.5 \text{ kW}$, $E_E = 117 \text{ kW}$, $E_{D,E} = 241.5 \text{ kW}$
COP	0.455
ECOP	0.24
Giren Enerji=Çıkan Enerji $\rightarrow (Q_{J,TÜM} + Q_E = Q_{A,TÜM} + Q_K)$	
$(2061 + 1939 + 1818.5 = 2001 + 1933 + 1879.7) \rightarrow 5818.5 \approx 5813.7$	
Tüm Çevrim (giren ekserji $(E_{TÜM} = E_{J,TÜM} + E_E = 337.8 + 150.5 + 117 = 605.3)$	
Tüm Çevrim (giren ekserji = çıkan ekserji = Kayıp + tersinmezlikler)	
$(E_{D,TÜM} + E_{kayıp,TÜM} = E_K + E_{A1} + E_{A2} + E_{D,E} = 46 + 76.4 + 239.1 + 241.5 = 603)$	
giren ekserji = çıkan ekserji $\rightarrow 605.3 \approx 603$	
Hata $= (605.3 - 603) / 605.3 = 0.004$	

Evaporatör ve absorberlerin daha iyi tasarlanması, geliştirilmesi ve iyileştirilmesi absorpsiyonlu soğutma çevrimlerinin çalışma koşullarını ve performansını iyileştirme yönünde etkileyecektir.

Yukarıda elde edilen sonuçlar çift etkili sistemin tek ve yarım etkili sistemlerden daha yüksek COP ve ECOP değerlerine sahip olduğunu göstermiştir. Ancak tek etkili sistem yarım ve çift etkili sistemlerden daha az cihaz gerektirdiğinden tek etkili sistemler yarım ve çift etkili sistemlerden daha ucuz ve basittir. Üç çevrimin hesaplarında % 0.5 civarında bir hata ortaya çıkmış olup ihmal edilebilir seviyededir. Düşük sıcaklıktaki ısı enerjisi kaynaklarından absorpsiyonlu soğutma için en uygun çevrim yarım etkili çevrimdir. Elde edilen sonuçlar literatürde elde edilen sonuçlarla uyumludur.

4. Tartışma

Absorpsiyonlu soğutma çevrimleri atık ısı, güneş enerjisi ve jeotermal enerji gibi düşük sıcaklıktaki ısı enerjisini kullanabilen, çevre dostu, çok az elektrik enerjisi gerektiren, ucuz ve

maliyetleri düşüren bir teknolojiye sahiptir. Bu çalışmada paralel akışlı çift etkili, tek etkili ve yarım etkili absorpsiyonlu soğutma çevrimlerinin ekserji analizi yapılmış ve karşılaştırılmıştır. Akışların entalpi ve entropi değerlerini hesaplamak için yazar tarafından FORTRAN dilinde bilgisayar program yazılmış ve kullanılmıştır. Paralel akışlı çift etkili sistem, tek ve yarım etkili sistemlerden daha avantajlı olup, daha yüksek COP ve ECOP değerlerine sahiptir. Çift etkili sistemin COP ve ECOP değerleri sırasıyla 1.196 ve 0.284 iken, tek etkili sistemde COP ve ECOP değerleri sırasıyla 0.68 ve 0.254 ve yarım etkili sistemde COP ve ECOP değerleri sırasıyla 0.455 ve 0.24 bulunmuştur. Düşük sıcaklıklarda ısı kaynakları için yarım etkili absorpsiyonlu soğutma çevrimi en uygun çevrimdir. Çevrimleri oluşturan her bir cihazın ekserji kayıpları hesaplanmış ve en çok ekserji kaybının evaporatör ve absorberde olduğu görülmüştür. Evaporatör ve absorberlerin daha iyi tasarlanması, geliştirilmesi ve iyileştirilmesi absorpsiyonlu soğutma çevrimlerinin çalışma koşullarını ve performansını iyileştirme yönünde etkileyecektir.

5. Semboller

COP	Soğutma etkinlik katsayısı
e	özüml ekserji (kJ/kg)
$\dot{E}$	ekserji (kW)
h	özüml entalpi (kJ/kg), (kJ/kMol)
$\dot{m}$	kütle akış oranı (kg/s)
P	basınç (kPa)
$\dot{Q}$	ısı enerjisi (kW)
s	özüml entropi (kJ/kg K)
T	sıcaklık (K)
$\dot{W}$	güç (kW)
η	verim

Alt İndis

A	absorber
-----	----------

C	kondanser
D	tersinmezlik
en	enerji
ex	ekserji
E	evaporator
GV	genleşme valfi
ID	ısı değıştiricisi
YBJ	yüksek basınçlı jeneratör
L	kayıp
LPG	düşük basınçlı jeneratör
OC	tüm çevrim
P	pompa
0	çevre koşullarında

6. Kaynaklar

- ASHRAE, Fundamentals Handbook, (2001). Chapter 1. Thermodynamics and refrigeration cycles.
- Srikhirin, P., Aphornratana, S. and Chungpaibulpatana, S. (2001). A review of absorption refrigeration technologies. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 5: 343-372.
- Garousi Farshi, L., Mahmoudi, S.M.S., Rosen, M.A., Yari, M. and Amidpour, M. (2013). Exergoeconomic analysis of double effect absorption refrigeration systems. *Energy Conversion and Management*, 65: 13-25.
- Domínguez-Inzunza, L.A., Sandoval-Reyes, M., Hernández-Magallanes, J.A. and Rivera, W. (2014). Comparison of the performance of single-effect, half-effect, double-effect in series and inverse absorption cooling systems operating with the mixture $H_2O/LiBr$. *Energy Procedia*, 57: 2534-2543.
- Domínguez-Inzunza, L.A., Hernández-Magallanes, J.A., Sandoval-Reyes, M. and Rivera, W. (2014). Comparison of the performance of single-effect, half-effect, double-effect in series and inverse and triple-effect absorption cooling systems operating with the NH_3-LiNO_3 mixture. *Applied Thermal Engineering*, 66: 612-620.
- Talukdar, K., and Gogoi, T.K. (2016). Exergy analysis of a combined vapor power cycle and boiler flue gas driven double effect water-LiBr absorption refrigeration system. *Energy Conversion and Management*, 108: 468-477.
- Colorado, D. and Rivera, W. 2015. Performance comparison between a conventional vapor compression and compression-absorption single-stage and double-stage systems used for refrigeration. *Applied Thermal Engineering*, 87: 273-285.
- Kaynaklı, Ö., Saka, K. and Kaynaklı, F. (2015). Energy and exergy analysis of a double effect absorption refrigeration system based on different heat sources. *Energy Conversion and Management*, 106: 21-30.
- Avanessiana, T. and Ameri, M. (2014). Energy, exergy, and economic analysis of single and double effect LiBr-H₂O absorption chillers. *Energy and Buildings*, 73: 26-36.
- Bouaziz, Nahla and Lounissi, D., (2015). Energy and exergy investigation of a novel double effect hybrid absorption refrigeration system for solar cooling. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(1): 3849-3856.
- Gebreslassie, B.H., Medrano, M. and Boer, D. (2010). Exergy analysis of multi-effect water-LiBr absorption systems: From half to triple effect. *Renewable Energy*, 35: 1773-1782.
- Annamalai, K. and Puri, I.K. (2002). Advanced thermodynamics engineering, CRC Press LLC.
- Dincer, I. and Rosen, M.A., (2007). EXERGY, energy, environment and sustainable development, 1st ed., Elsevier Ltd.
- Chua, H.T., Toh, H.K., Malek, A., Ng, K.C. and Srinivasan, K. (2000). Improved thermodynamic property fields of LiBr-H₂O solution, *International Journal of Refrigeration*, 23: 412-429.
- Kaita, Y. (2001). Thermodynamic properties of lithium bromide-water solutions at high temperature. *International Journal of Refrigeration*, 24: 374-390.

Donanım Tabanlı Trivium Akış Şifreleme Algoritmasının FPGA Ortamında Gerçekleştirilmesi

Ali Murat GARİPCAN¹, Ebubekir ERDEM¹, Taner TUNCER¹

¹Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, ELAZIĞ
aberdem@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 01.04.2017; Kabul/Accepted: 06.07.2017)

Özet

Bu çalışmada, kriptografide LFSR(Linear Feedback Shift Register-Doğrusal Geri Beslemeli Kaydırmalı Yazmaç) tabanlı senkron simetrik şifreleme yöntemlerinden biri olan ve rasgele sayı üretici olarak da kullanılabilen Trivium dizi/akış şifreleme algoritması, VHDL(Very High Speed Hardware Description Language – Çok hızlı donanım tanımlama dili) dili yardımıyla sonlu durum makinası olarak modellenmiştir. Modellemesi yapılan algoritma, FPGA (Field Programmable Gate Array- Sahada Programlanabilir Kapı Dizileri) ortamında gerçekleştirilmiş ve kriptografik uygulamalarda sayısal verinin şifrenmesi için anahtar olarak kullanılan rastgele görünümü bit dizileri üretilmiştir. Algoritmanın doğruluğu, fonksiyonel simülasyon araçları yardımıyla zamansal olarak test edilerek üretilen bit dizilerinin rastgelelik değerleri NIST(National Institute of Standards and Technology – Ulusal Standartlar ve Tek. Enstitüsü) kriterleri doğrultusunda ölçülerek elde edilen sonuçlar yorumlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Trivium, Akış şifreleme, Rasgele sayı üreticileri, NIST testleri.

Hardware Based Trivium Stream Cipher Algorithm Implementation on FPGA Environment

Abstract

In this study, Trivium array/stream encryption algorithm which is synchronous and one of the symmetric encryption methods based on LFSR(Linear Feedback Shift Register) used in cryptography, is modeled as a finite state machine via the VHDL(very high speed integrated circuit- hardware description language). The modeling algorithm is implemented in the scene FPGA (Field Programmable Gate Array) environment and random-looking bit sequences that are used as keys, are generated for the encryption of numeric data in cryptographic applications. The accuracy of the algorithm is tested temporally with the aid of functional simulation tools and the results obtained by measuring the randomness values of the generated bit sequences in terms of NIST(National Institute of Standards and Technology) criteria, are interpreted.

Keywords : Trivium, Stream cipher, Random number generators, NIST tests.

1. Giriş

Son yıllarda sayısal haberleşme teknolojilerini kullanan kişi sayısının artışına bağlı olarak güvensiz iletişim ortamları üzerinden taşınan verinin önem seviyesine bağlı olarak güvenliği önemli bir konu haline gelmiştir. Bu nedenle iletişime konu veriler üzerinde saldırganların olumsuz etkilerini azaltmak ve bu verilerin sadece alıcıları tarafından anlaşılabilirliğini sağlamak için kriptografik çözümlerin kullanılması zorunlu hale gelmiştir.

Kriptografi, sayısal iletişim ortamı üzerinden aktarılan verilerin yetkisiz erişimlerden korunması amacıyla geri dönüşümü mümkün olacak şekilde değiştirilerek iletilmesini sağlayan algoritmaların tasarımı ve analizi ile ilgilenir. Kriptografide bu maksatla kullanılan algoritmalar, gizli bir anahtar yardımıyla sayısal verilerinin anlaşılma hale dönüştürülmesi(şifreleme) ve alıcı tarafta anlaşılabilirliğinin sağlanması ile ilgili tersi süreçleri(de-şifreleme) yerine getirir.

Algoritmaların neredeyse tamamı, şifreleme ve de-şifreleme işlemlerinin yanı sıra bazı kritik noktalarda kesinlikle gizli kalması gereken rasgele olarak üretilmiş değerlerin/sayıların kullanımına ihtiyaç duyar. Bu değerler içerisinde en önemlisi, hiç şüphesiz kriptosistemlerin sürdürülebilir güvenirliliği ve gücü konusunda belirleyici öneme sahip anahtar bileşenidir. Öyle ki; anahtar olmaksızın, şifreli metin saldırgan tarafından ele geçirilse dahi de-şifreli halinin elde edilmesi mümkün olmamalıdır. Fakat kriptografi de anahtar olarak kullanılacak tahmin edilmesi zor, tekrar üretilmesi mümkün olmayan rasgele sayı dizilerinin üretilmesi zordur. Ayrıca doğru yöntemler ile üretilmedikleri takdirde kullanıldıkları kriptografik uygulamaların güvenliğini bütünüyle tehlikeye atarlar. Bu nedenle algoritmik esaslara dayalı kriptosistemlerin, karmaşıklığının ve gizliliğin tümüyle üzerinde tutulduğu anahtar dizilerinin üretimi önemli bir probleme karşılık gelir [1].

Kriptosistemler içerisinde kullanılan rasgele sayılar, “Rasgele Sayı Üreteçleri” yardımıyla elde edilirler. Üreteçler; belli bir algoritma, matematiksel bir formül, önceden hesaplanmış tablolar veya sonuçları kestirilemeyen fiziksel süreçleri kullanılarak çeşitli şekillerde rasgele sayıların üretilmesini sağlayan yapılardır. Üreteçler, kendi aralarında sözde, gerçek ve hibrit rasgele sayı üreteçleri olmak üzere üç ayrı tasarım sınıfına ayrılır. Gerçek SRÜ, üretilen sayı dizisinin rasgelelik kaynağı olarak matematiksel olarak ifade edilemeyen fiziksel olayların kestirilemeyen davranışlarını kullanır. Aynı zamanda sözde rasgele sayı üretici olarak da kullanılan akış şifreleme algoritmaları, başlangıç parametrelerine(tohum değerlere) ihtiyaç duyarlar ve bu parametreleri kullanarak deterministik yollarla rasgele görünümlü sayı dizileri üretirler. Bu üreteçlerin birbirlerine göre üstünlükleri ve eksikleri bulunmakla birlikte kriptografik uygulamaların önem seviyesine göre kullanımları da farklılık göstermektedir.

Bu çalışmada, ilk iki bölüm içerisinde kriptografik temel kavramlar, akış şifreleme sistemleri ve bu sistemler içerisinde kullanılan rastgele sayı üreteçlerinin yapısal özellikleri ile ilgili genel bilgiler verilmiştir. Üçüncü bölümde, çalışma içerisinde Trivium akış şifreleme

algoritmasının yapısı incelenmiştir. Dördüncü bölümde Trivium akış şifreleme algoritmasının tasarım metodolojisi ve gerçekleştirme adımları detaylı biçimde açıklanarak kullanılan FPGA mimarisi hakkında bilgiler sunulmuştur. 5. bölümde algoritmanın benzetim araçları ile mantıksal doğrulanması ve FPGA üzerinde gerçekleştirilmesi verilmiştir. 6. bölümde farklı tohum değerlerine karşılık elde edilen anahtar dizilerin rasgelelik ölçümleri sunulmuş olup son bölümde ise elde edilen sonuçlar tartışılmıştır.

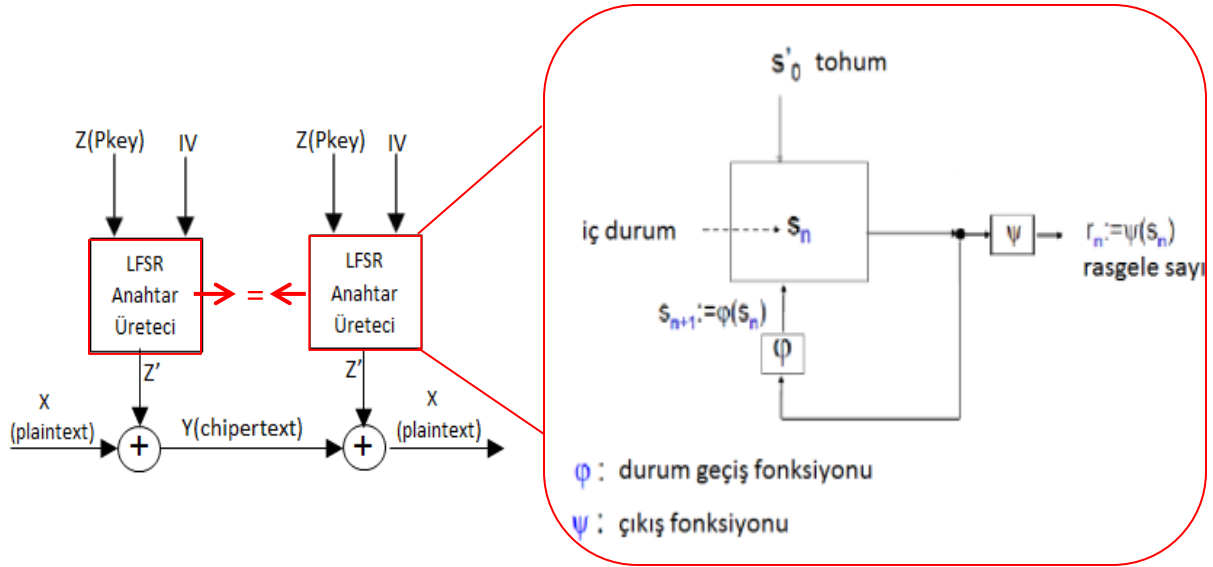
2. Akış Şifreleme Sistemleri ve Sözde Rastgele Sayı Üreteçleri

Kriptografide Verman şifreleme olarak da bilinen akış şifreleme sistemleri, blok veya asimetrik şifreleme yöntemlerine göre çok daha yüksek hızlarda şifreleme performansı sunmaktadır. Akış şifreleme için kullanılan algoritmalar, verinin her bir biti yine verinin kendisiyle eşit uzunlukta bir anahtar dizisinin bitleriyle ayrı ayrı XOR fonksiyonundan geçirilmesi esasına dayanmaktadır [2]. Dolayısıyla şifreleme ve de-şifreleme işlemleri için verinin uzunluğuna bağlı olarak değişkenlik gösteren anahtar dizilerinin algoritmalar içerisinde üretilebilmesi şarttır. Şekil 2’ de akış şifreleme algoritmalarının genel yapısı verilmiştir. Şifreleme işleminden önce algoritmalar Şekil 1’ deki sözde bir rasgele sayı üreticinin genel tasarım mimarisine karşılık gelen işlemleri yerine getirir. Böylece şifreleme ve de-şifreleme işlemi için ihtiyaç duyulan özdeş rasgele anahtar dizilerini kendi içerisinde üretmiş olurlar.

Şekil 1’ deki tasarım mimarisi içerisinde $r_1, r_2, \dots, r_n \in R$ rasgele sayı dizisini, $S_n \in S$ ise saf üreticinin iç durumlarını temsil eder. Tasarım içerisinde sonlu S ve R kümeleri sözde rasgele sayı üreticinin durum uzayı ile çıkış uzayıdır. $\Psi : S \rightarrow R$ çıkış fonksiyonu, $r_n = \Psi(S_n)$ olacak biçimde mevcut S_n durumundan r_n rasgele sayısını üretir. Ardından ϕ geçiş fonksiyonu kullanılarak S_n durumu $S_{n+1} = \phi(S_n)$ şeklinde güncellenir. Tasarım içerisinde ilk iç durumu temsil eden ve S_1 değeri tohum değere karşılık gelen S_0 durumunun $S_1 = \phi(S_0)$ şeklinde veya daha karmaşık şekilde oluşturulabilir [1,3].

Anahtar dizisi elde edildikten sonra Şekil 2’ de açıkça görüldüğü üzere elde edilen anahtar dizisinin her bir bitini şifrelenecek metnin her bir bitiyle bir fonksiyona (genellikle XOR işlemi) sokarak şifreli metni elde eder. Simetrik şifreleme kategorisinde yer alan akış şifreleme sistemlerinde, metnin de-şifreli halinin alıcı

tarafında elde edilebilmesi için gönderici tarafta kullanılan tohum değerlerin alıcı tarafta da bilinmesi veya gerekir. Çünkü de-şifreleme için kullanılacak olan özdeş anahtarın, algoritmalar içerisinde ancak şifreleme için kullanılan tohum değerler ile elde edilmesi mümkündür.



Şekil 1. Sözde bir rasgele sayı üreticinin genel tasarım mimarisini [1]

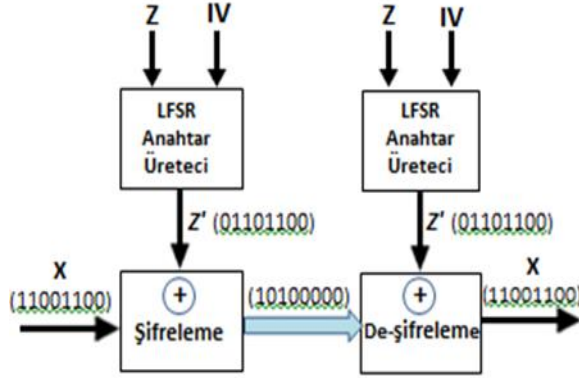
Donanım tabanlı akış şifreleme sistemlerinde, genelde doğrusal geri beslemeli öteleyici saklayıcılar(LFSR) kullanılır. LFSR’ler iyi istatistiksel özellikler gösteren, geniş periyoda sahip rasgele görünümlü anahtar dizilerini, düşük maliyetle üreten, donanımsal gerçeklemeleri kolay deterministik algoritmalar. Şifreleme için kullanılan algoritmaların güvenlik ihtiyaçlarına bağlı olarak artan yapısal karmaşıklıkları, işleme sürelerini arttırarak iletim hızını düşürmenin yanı sıra güç tüketimlerini de arttırmaktadır. Bilgi güvenliğinin yanında işlem maliyeti ve hız kavramlarının da ön plana çıktığı uygulamalarda donanım tabanlı yaklaşımlar çok daha verimli ve etkili sonuçlar ortaya koyarlar [4,5,6,7].

Akış şifreleme sistemleri kendi içerisinde iyi istatistiksel özelliklere sahip anahtar dizileri üretebilirler. Fakat algoritmik yapılarından dolayı standart bir tanıma karşılık geldiklerinden ötürü, üretilen anahtar dizilerinin gerçekte

rasgele oldukları söylenemez. Bu durum üreteçlerin çekirdek iç durumlarının veya tohum değerlerinin bilinmesi durumunda üretilen anahtar bitlerinin tamamının tahmin edilmesini mümkün kılar. Bu nedenle hassas kriptografik uygulamalarda tohum değerlerinin olabildiğince rastgele ve tahmini zor olmalıdır. Tohum değerlerinin ve üreteçlerin çekirdek durumlarının mutlak gizliliğinin sağlanması sistemin güvenliği açısından mutlak öneme sahiptir. Ayrıca algoritmaların içyapısı itibarıyla, Şekil 1’de gösterilen durum ve geçiş fonksiyonlarının olabildiğince karmaşık bağıntılar içermesi çıkışta elde edilen rasgele görünümlü sayı dizilerinin tahmin edilmesini zorlaştırır [8].

Genel yapısı Şekil 2’de verilen akış şifrelemede gerçek gizli anahtar (Z), LFSR yapısının çıkışındaki kayar anahtardan farklıdır. K bitlik gizli anahtar Z, LFSR tabanlı üretici kontrol ederek kayar anahtar(asıl anahtar) dizisi $Z_1', Z_2', \dots, Z_n'$ nin üretilmesini sağlar. Burada

Z' anahtar dizisini üreten K bitlik gerçek gizli anahtar, Z' ye tohum (seed) denir. Gerçek gizli anahtar (Z) hiçbir zaman şifreleme işleminde doğrudan kullanılmaz. Gizli anahtarın uzunluğu kayar anahtarın uzunluğu yanında oldukça küçüktür ($K \ll N$). Şifreli metin bitleri, Denklem 1' deki gibi ikili açık-metin bitlerinin kayar anahtar dizisiyle terim terim modülo-2 toplanması sonucunda elde edilirler [9]. Tipik bir akış şifreleme sisteminin, şifreleme ve de-şifreleme işlemleri için kullandığı yöntem Denklem 1 ve Denklem 2' de verilmiştir. X_n , şifrelenecek metnin n . biti, Y_n , anahtar dizisinden geçirilerek elde edilmiş şifreli metnin n . biti, Z'_n ise LFSR çıkışındaki kayar anahtar(şifreleme ve de-şifreleme anahtarı) dizisinin n . bitidir.



Şekil 2. Akış şifreleme sistemlerinin genel yapısı

$$Y_n = X_n \oplus Z'_n \quad n = 1, 2, \dots, N \text{ (Şifreleme)} \quad (1)$$

$$X_n = Y_n \oplus Z'_n \quad n = 1, 2, \dots, N \text{ (De şifreleme)} \quad (2)$$

Akış şifreleme sistemlerinde şifreleme ve şifre çözme işlemleri, iç yapısı zamana bağlı durum değiştiren eşdeğer donanımsal yapılar üzerinde gerçekleştirilmektedir. De-şifreli metnin elde edilmesi süreci, şifreleme işleminin tersine girdi olarak şifrelenmiş metin bitlerini LFSR yapısının çıkışındaki kayar anahtar dizisiyle terim terim modülo-2 toplanması sonucunda elde edilir. Şifreli metnin açık halinin elde edilmesi süreci Denklem 2' deki gibidir.

3. Trivium Akış/Dizi Şifreleme Algoritması

Mevcut akış şifreleme algoritmalarının daha az gerçekçi kriptanalitik saldırılarla karşı karşıya kaldıkları ve bu anlamda blok şifreleme algoritmalarına göre daha az ilgi odağı oldukları görülmüştür. Bu nedenle kolay kontrol edilebilir güvenlik ölçütleriyle yeni akış şifreleme algoritmalarının tasarımı amacıyla 2004-2008 yılları arasında eSTREAM(the ECRYPT Stream Cipher Project) projesi başlatılmıştır. Proje yazılım, donanım ve yazılım-donanım olmak üzere üç ayrı kategoride düzenlenmiştir. Christophe De Canniere ve Bart Preneel tarafından 2006 yılında sunulan Trivium, iki yıllık değerlendirmeler sonucunda 2008 yılında donanım kategorisinden Grain [10] ve MICKEY [11] ile birlikte kabul edilen üç algortmadan biri olmuştur [12,13].

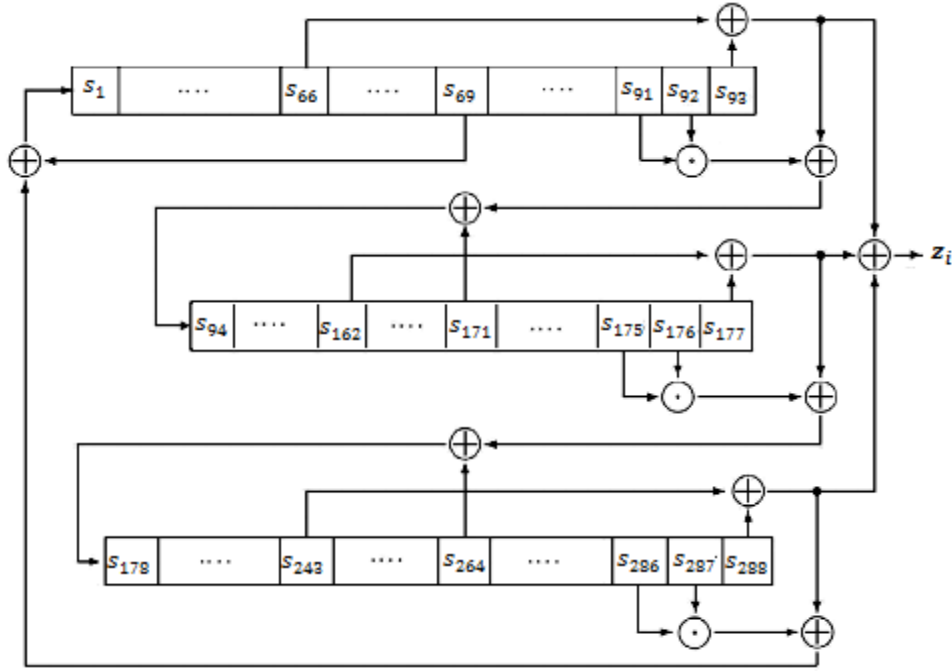
Grain ve MICKEY algoritmaları, kendi içerisinde bir adet LFSR, bir adet NFSR(Nonlinear Feedback Shift Register-Doğrusal Olmayan Geri Beslemeli Saklayıcı) olmak üzere toplam iki adet, shift register yapısını kullanır. MICKEY algoritmasında shift register yapıları düzensiz saat girişleriyle tetiklenir. Her üç algoritma donanımsal gerçekleştirme için ihtiyaç duyulan lojik kapı sayısının azlığına bağlı olarak donanımsal karmaşıklığı ve enerji tüketimleri azdır. Bu nedenle küçük donanımsal yapılar üzerinde gerçeklemeye yatkındırlar. Şifreleme performanslarının, algoritmalar içerisinde kullanılan tohum değerlerin uzunluğuna bağlı olarak değişebileceği unutulmamalıdır. MICKEY algoritması, Trivium ve Grain' e göre gerçekleştirme için daha az donanımsal kaynağa ihtiyaç duymaktadır [7, 14,15].

Bit tabanlı senkron akış şifreleme algoritması olan Trivium algoritması güvenlik, hız ve esneklikten fedakarlık etmeden bir dizi şifreleme sisteminin ne kadar basitleştirilebileceğini araştırmak için tasarlanmıştır. En basit tasarım yapısına sahip olmasının yanı sıra Trivium, Grain ve MICKEY ile performans olarak kıyaslandığında çıkış bit oranı yüksektir ve şifreleme işlemi için en az süreye ihtiyaç duyan bir algortmadır. Bu nedenle hız kavramının öne çıktığı kriptografik

uygulamalar için düşük enerji tüketimiyle de ön plana çıkmaktadır [7,15, 16].

Şekil 3’ de görüldüğü üzere Trivium içyapısı itibariyle 288 bitlik tek parça gibi davranan her biri 93, 84 ve 111 bitlik üç ayrı doğrusal olmayan LFSR(register) yapısını kullanır. Algoritma fonksiyonel olarak başlangıç değerlerinin(private key ve initial vector)

yüklenerek iç durum oluşturulması ve anahtar dizinin elde edilmesi gibi iki ayrı aşamadan oluşur. 288 bitlik LFSR’ nin 15 adet biti mantıksal düzeyde işlemlere tabi tutularak üç ayrı noktadan sisteme non-lineer geri besleme olarak verilmektedir. Algoritma 80 bitlik gizli anahtar ve 80 bitlik başlangıç vektörleriyle çıkışta 2^{64} bitlik sahip anahtar dizisi üretebilir.



Şekil 3. Trivium akış şifreleme algoritmasının donanımsal içyapısı

Şekil 3’te görüldüğü üzere her registerin çıkışı aslında diğer registerin girişine bağlı olacak şekilde ayarlanmıştır. Bu nedenle algoritma, tek parça olarak davranan dairesel bir register yapısı şeklinde düşünülebilir [17]. Trivium’ un, anahtar dizisinin elemanlarını çıkış olarak üretmeye hazır hale gelmeden önce yükleme ve kaydırma gibi ön işlemler ile iç durum güncellemesi yapması gerekir. Yükleme işlemi için, 80 bitlik gizli anahtar(private key) ile 80 bitlik başlangıç vektörü(initial vector) LFSR üzerine yüklenerek 288, 287, 286. bitler lojik ‘1’ yapılır. Kaydırma işleminde ise oluşturulan 288 bitlik iç durum dört tam tur boyunca($4 \times 288 = 1152$ adım) döndürülür. Seçilen 15 özel bitin mantıksal işlemden geçirilerek geri beslenmesi yoluyla iç durum güncellemesi her adımda yapılarak hazır duruma getirilir. Bu

aşamada anahtar dizisine ait lojik seviyede herhangi bir çıkış gözlenmez. Algoritmanın başlangıç parametreleri Tablo 1’ de verilmiştir.

Tablo 1. Trivium parametreleri

Gizli Anahtar	80 bit
Başlangıç Vektörü	80 bit
İç durum uzunluğu	288 bit

Algoritmaya ait Tablo 2 ve Tablo 3’ te verilen sözde kod yapısı içerisinde kullanılan tanımlamalar aşağıdaki gibidir:

- $(s_m, \dots, s_n) = 288$ bitlik LFSR yapısı
- $S_i = 288$ bitlik LFSR üzerindeki i . bit
- $z_t = t$. sürede üretilen anahtar biti
- $\oplus$ operatörü, XOR işlemi
- $\cdot$ işareti AND işlemi
- $t_1, t_2, t_3 =$ aktif geri besleme bitleri

Trivium' un sırasıyla iç durum oluşturma ve anahtar bitlerini üretme işlemlerine karşılık sözde kod yapısı sırasıyla Tablo 2 ve Tablo 3' deki gibidir.

Tablo 2. İç durum işlemleri sözde kod yapısı

```

( $s_1, s_2, \dots, s_{93}$ )  $\leftarrow$  ( $K_1, \dots, K_{80}, 0, \dots, 0$ )
( $s_{94}, s_{95}, \dots, s_{177}$ )  $\leftarrow$  ( $IV_1, \dots, IV_{80}, 0, \dots, 0$ )
( $s_{178}, s_{179}, \dots, s_{288}$ )  $\leftarrow$  ( $0, \dots, 0, 1, 1, 1$ )
for  $i=1$  to  $4*288$  do
   $t_1 \leftarrow s_{66} \oplus s_{93}$ 
   $t_2 \leftarrow s_{162} \oplus s_{177}$ 
   $t_3 \leftarrow s_{243} \oplus s_{288}$ 
   $t_1 \leftarrow t_1 \oplus s_{91} \cdot s_{92} \oplus s_{171}$ 
   $t_2 \leftarrow t_2 \oplus s_{175} \cdot s_{176} \oplus s_{264}$ 
   $t_3 \leftarrow t_3 \oplus s_{286} \cdot s_{287} \oplus s_{69}$ 
  ( $s_1, s_2, \dots, s_{93}$ )  $\leftarrow$  ( $t_3, s_1, \dots, s_{92}$ )
  ( $s_{94}, s_{95}, \dots, s_{177}$ )  $\leftarrow$  ( $t_1, s_{94}, \dots, s_{176}$ )
  ( $s_{178}, s_{179}, \dots, s_{288}$ )  $\leftarrow$  ( $t_2, s_{178}, \dots, s_{287}$ )
end for

```

Tablo 3. Anahtar üretme işlemleri sözde kod yapısı

```

for  $i=1$  to  $n$  do
   $t_1 \leftarrow s_{66} \oplus s_{93}$ 
   $t_2 \leftarrow s_{162} \oplus s_{177}$ 
   $t_3 \leftarrow s_{243} \oplus s_{288}$ 
   $z_i \leftarrow t_1 \oplus t_2 \oplus t_3$ 
   $t_1 \leftarrow t_1 \oplus s_{91} \cdot s_{92} \oplus s_{171}$ 
   $t_2 \leftarrow t_2 \oplus s_{175} \cdot s_{176} \oplus s_{264}$ 
   $t_3 \leftarrow t_3 \oplus s_{286} \cdot s_{287} \oplus s_{69}$ 
  ( $s_1, s_2, \dots, s_{93}$ )  $\leftarrow$  ( $t_3, s_1, \dots, s_{92}$ )
  ( $s_{94}, s_{95}, \dots, s_{177}$ )  $\leftarrow$  ( $t_1, s_{94}, \dots, s_{176}$ )
  ( $s_{178}, s_{179}, \dots, s_{288}$ )  $\leftarrow$  ( $t_2, s_{178}, \dots, s_{287}$ )
end for

```

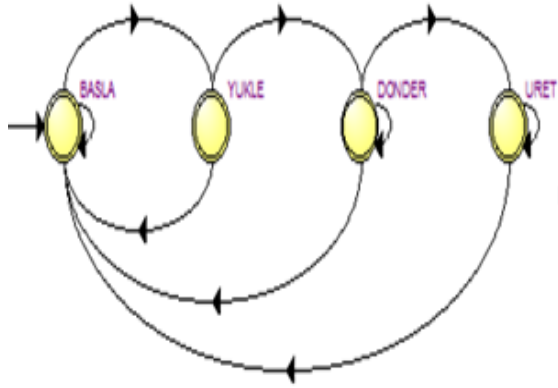
Sözde kodları Tablo 3' de verilen ikinci aşamada ise, başlangıç durumuna getirilmiş 288 bitlik LFSR yapısı şifrelenecek metnin bit cinsinden toplam uzunluğu (n bit) kadar kaydırılır. Her kaydırma işleminde LFSR üzerinden seçilmiş 15 özel bit Şekil 1' de belirtilen çıkış ve geçiş fonksiyonlarına karşılık gelen mantıksal işlemlerden geçirilir. Lojik düzeyde her bir anahtar bit çıkışı için LFSR' nin iç durum güncellemesi ilk aşamada olduğu gibi tekrarlı bir biçimde istenen sayıda anahtar bit üretilinceye kadar yapılmaya devam eder [18].

4. Trivium Akış Şifreleme Algoritmasının FPGA Üzerinde Gerçeklemesi

Uygulama için, içerdikleri mantıksal bloklar ile bu bloklar arasındaki bağlantıları, istenen fonksiyona göre üretimden sonra yüksek seviyeli donanım tanımlama dilleri ile tekrar tekrar programlanabilme özelliğine sahip FPGA donanımı kullanılmıştır. Sahada programlanabilme özelliğine sahip FPGA donanımlarının en özelliklerinden birisi de paralel işlem yapabilme yeteneğidir. Aynı anda birden fazla işlem yapabilen FPGA donanımları; diğer entegrelere göre çok daha yüksek hızlarda çalışarak zaman ve maliyet anlamında kullanıcılara önemli kolaylıklar sağlamanın yanı sıra karmaşık devre elemanlarının işlevselliğini arttırmaktadır [19].

Trivium akış şifreleme algoritmasının gerçekleştirme işlemi için Altera Cyclone IV EP4CE114FC6 serisi FPGA donanım kartı kullanılmıştır. Tasarım aşamasında davranışsal modelleme işlemleri için yüksek hızlı donanım tanımlama dillerinden biri olan VHDL dili kullanılmıştır. Oluşturulan davranışsal modelin sentezleme, optimizasyon ve simülasyon işlemleri için ise Altera'ya ait Quartus II ile yine aynı yazılım tarafından desteklenen fonksiyonel ve zamansal simülasyon aracı Modelsim-Altera yazılım geliştirme araçları kullanılmıştır.

LFSR tabanlı akış şifreleme sistemleri; genelde sınırlı sayıda durum ve bu durumlar arasındaki geçişler ile durumların kendisine karşılık gelen kombinasyonel eylemlerden oluşan bir davranışsal makina modelidir. Dolayısıyla ilk olarak Trivium akış şifreleme algoritması Moore senkron ardışıl devre modeli olarak tasarlanmış ve tasarımdaki durumların neler olacağı, sayısı ve birbirleriyle ilişkileri ile kontrol geçişleri belirlenmiştir. VHDL dili içerisinde ardışıl devrelerin modellenmesi için FSM(Finite State Machine-sonlu durum makinası) kodlama tekniği kullanılmıştır. Kodlanan algoritmanın kendisine karşılık gelen ardışıl devreye ait dört durumlu FSM modeli Şekil 4' teki gibidir.



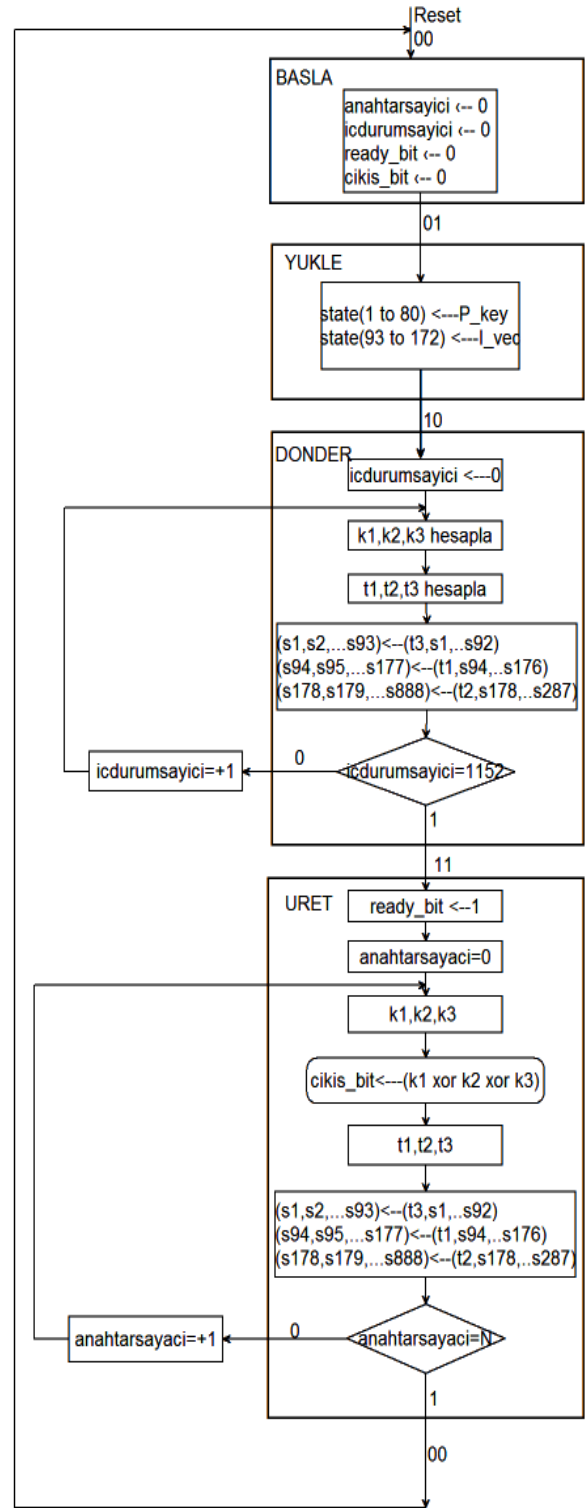
Şekil 4. Dört durumlu FSM Modeli

FSM modelinde her bir durum ve bu durumlar içerisinde tanımlı kombinyonel işlemler ile ilgili davranışsal tanımlamalar yapılmıştır. Süreç kısaca aşağıdaki gibi özetlenebilir.

İlk olarak giriş çıkış portları ile ilgili genel tanımlamalar yapılmıştır. Ardından 288 bitlik LFSR yapısına ait vektörel tanımlama işlemi yapılarak bütün değerlerine lojik '0' değeri atanır. Daha sonra algoritmanın çalışması için gerekli olan hexadicamal olarak rastgele atanmış 80 bitlik tohum değeri (gizli anahtar) ile tüm elamanları lojik '0' olacak şekilde başlangıç vektörü (IV) tanımlamaları yapılmış ve LFSR yapısı üzerinde belirlenen aralıklara yerleştirilmiştir.

Durumlar arası geçiş işlemleri için iki bitlik lojik kontrol değişkeni tanımlaması yapılmıştır. FSM, durumlar arasında geçişler tanımlanan iki bitlik lojik kontrol değişkeninin "00" değeri için "BASLA", "01" değeri için "YUKLE", "10" değeri için DONDUR ve "11" değeri için "URET" pozisyonunda olup bu durumlar için sırasıyla aşağıdaki işlemleri yapacaktır.

Sonlu durum makinasının algoritmik yapısını gösteren ASM(Algorithmic State Machine – Algoritmik Durum Makinası) diyagramı ile her durum içerisinde yapılan kombinyonel işlemler Şekil 5' teki gibidir.



Şekil 5. FSM'ye ait ASM diagramı

4.1. “BASLA” durumu

FSM, başlangıç konumunda boş pozisyonundadır. Bu konumda, iç durum güncelleme ve anahtar bitlerini üretmek için tanımlanan sayaç sinyalleri ile anahtar çıkışı lojik ‘0’ seviyesindedir. Ayrıca çıkış bitlerinin sadece iç durum güncellemesinden sonra çıkışa aktarılması için kullanılan kontrol sinyali lojik ‘0’ seviyesindedir. FSM, durum değiştirmek için durumlar arasında geçişleri sağlayan kontrol sinyalini bekler. Kontrol sinyali “01” olduğunda durum değiştirerek yükleme konumuna geçer.

4.2. “YUKLE” durumu

FSM, yükleme durumunda 80 bitlik gizli anahtar ile başlangıç vektörünü sırasıyla 288 bitlik LFSR yapısının ilk 0-80 ve 93-172. bitleri arasına yerleştirir. Daha sonra LFSR yapısının en ağırlıklı üç bit (288,287,286. bitler) lojik ‘1’ seviyesine getirilerek, sonlu durum makinası, anahtar üretmeden önceki iç durum güncellemesi için hazır hale gelerek bir sonraki duruma geçer.

4.3. “DONDÜR” durumu

FSM, anahtar dizisine ait çıkış bitlerini üretmeye başlamadan önce 288 bitlik vektör tabanlı LFSR yapısını dört tam tur boyunca($4 \times 288 = 1152$ defa) kaydırır. Her kaydırma işleminde LFSR yapısı üzerinde seçilmiş 15 özel bit mantıksal işlemlerden geçirilerek geri besleme noktalarından sisteme girdi olarak verilir. 1152 defa tekrar eden bu durum için, iç durum alt sınırı temsil eden sayaç tanımlanmış ve ayrı bir process bloğu içerisinde her saat darbesinde alt sınır değeri artırılarak aynı durum içerisinde üst sınır değeriyle(1152) kontrolü yapılmıştır. FSM sayaç değeri üst sınır değerine ulaşana kadar aynı konumda kalarak kaydırma ve döndürme işlemlerini devam ettirir. Sayaç değeri üst sınır değere ulaştığı zaman saat darbesiyle bir sonraki duruma yani üretme pozisyonuna geçer ve anahtar bit dizisine ait lojik değişimleri çıkışa verir.

VHDL dilinin paralel çalışma özelliğinden dolayı aynı mimari içerisinde tanımlanan kod/process blokları yazılış sırasına

bakılmaksızın eş zamanlı çalışırlar. Bu nedenle oluşan karmaşıklığın giderilmesi ve FSM’ nin anahtar dizisine ait lojik değişimleri sadece anahtar üretme konumundayken çıkışa vermesi için bir bitlik lojik kontrol değişkeni kullanılmıştır. Bu anlamda lojik değişken, multiplexer gibi davranan bir kod bloğunun seçici ucu olarak düşünülmüştür. Lojik kontrol değişkeni FSM “URET” durumunda iken lojik ‘1’ seviyesindedir ve anahtar bitlerinin değişkenliği çıkışta gözlemlenebilir. Diğer durumlarda lojik ‘0’ olup, anahtar çıkış bitleri daima lojik ‘0’ seviyesinde kalır.

4.4. “URET” durumu

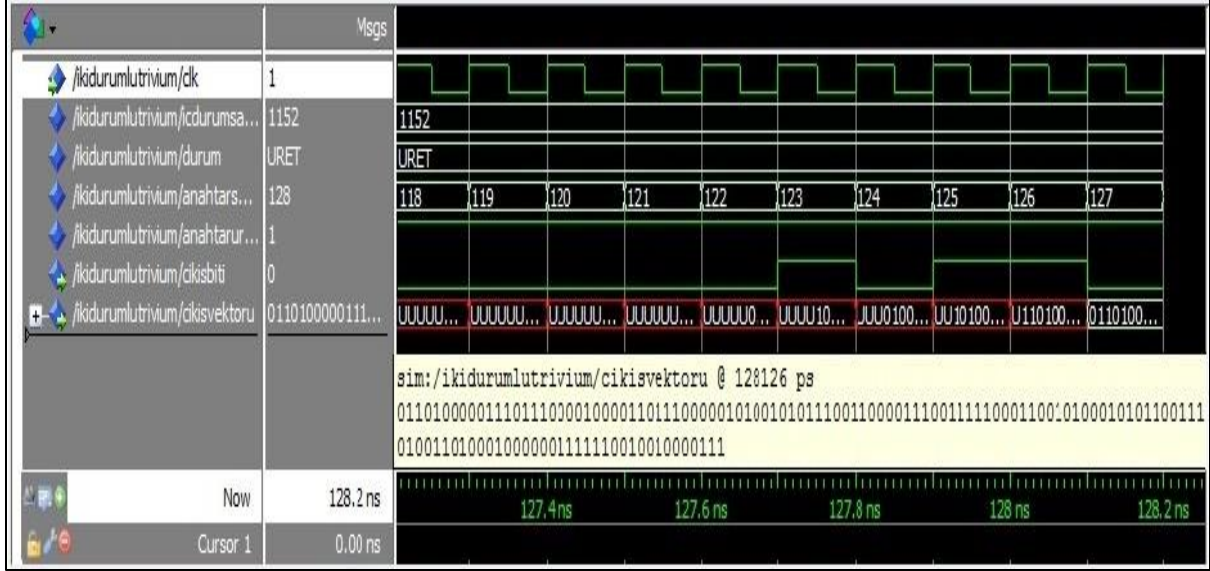
İç durum güncellemesini tamamlayan FSM, bu konumda bir önceki durumdan farklı olarak anahtar dizisine ait çıkış bitlerini üretir. Her çıkış bitinden sonra LFSR’ nin içyapısı, geri besleme yoluyla kaydırılarak güncellenir ve bir sonraki anahtar bitini üretmeye hazır konuma gelir. Bu durum, çıkış bitlerinin sayıca şifrelenecek metnin bit türünden sayısal uzunluğuna eşit oluncaya kadar tekrarlı bir şekilde devam eder. FSM’ nin anahtar dizisinin tüm bitlerini üretene kadar aynı konumda kalabilmesi için sayaç tanımlanmıştır. Her anahtar biti için sayaç değeri artırılarak üst sınır değere ulaşp ulaşmadığı kontrol edilmiştir. Anahtar dizisine ait tüm bitler üretildikten sonra sayaç değeri sıfırlanır ve FSM “BASLA” durumuna geri döner.

5. Algoritmanın Doğrulaması

FSM olarak modellenen Trivium akış şifreleme algoritması iki aşamada doğrulanmıştır. İlk aşamada FPGA boardu üzerine yüklenmeden önce mantıksal hataların önüne geçmek ve modelin doğru davranış sergilediğini görebilmek için Modelsim-Altera 10.1d benzetim aracı kullanılmıştır. Algoritma ilk olarak benzetim ortamında 32, 64, 128 bitlik üç ayrı anahtar dizisi için sırayla çalıştırılmıştır. Kullanılan lojik seviyedeki giriş, çıkış ve sayaç ve kontrol sinyalleri ile durumların zamana bağlı değişimleri izlenerek mantıksal doğrulaması yapılmıştır. Benzetim sonuçları şekil 6’ daki gibidir.

Gerçekleme aşamasında, mantıksal doğrulaması yapılan algoritmaya ait kodlar lojik düzeyde sentezlenerek, yerleştirme ve yönlendirme

işlemlerinin ardından FPGA donanımı üzerine yüklenerek, anahtar dizilerine ait lojik çıkışlar gözlemlenmiştir.



Şekil 6. Trivium akış şifreleme algoritmasının benzetim sonuçları

Sonlu durum makinası, üç ayrı anahtar dizisi için 0.2 ns(nanosaniye) ile 115.4 ns arasında yükleme kaydırma işlemlerini gerçekleştirerek iç durum güncelleme işlemlerini bitirerek ve anahtar üretme pozisyonuna geçmiştir. Anahtar dizilerinin 115,4 ns den sonra 32 bit için 118,6 ns, 64 bit için 120,6 ns ve 128 bit için 128.2 ns sürede üretildiği görülmüştür. Bir “.txt” uzantılı metin dosyasına rassallık ölçümü için yazılan bir milyon adet bitin ise yine 115.4 ns den başlayarak 100115.499 ns süre içerisinde üretildiği gözlemlenmiştir. Ayrıca algoritma benzetim ortamında adım adım çalıştırılarak herhangi bir durumda “reset” girişi lojik ‘1’ seviyesine çekildiğinde sonlu durum makinasının başlangıç konumuna geri döndüğü görülmüştür.

Doğrulamanın ikinci aşamasında rasgele sayılardan oluşan anahtar dizilerinin gerçek bir rastgele diziden beklenen yeterlilikleri karşılayıp karşılamadığına bakmak için teste tabi tutulmuştur. Bu konuda pek çok test(FIBS 140, DieHard, NIST vs.) bulunmasına rağmen bu çalışma kapsamında hipotez tabanlı NIST 800-22 istatistiksel test süiti kullanılmıştır. Diğer testlere oranla daha güçlü bir yapı içeren NIST

800-22 yazılım süiti rasgelelik ölçümü için kendi içerisinde 15 ayrı kritere ait testten oluşmaktadır. Teste tabi tutulan bit dizisinin başarılı olabilmesi için tüm testleri başarıyla geçmesi gerekmektedir.

Doğrulamanın ikinci aşamasında ise çıkış olarak elde edilen, şifreleme ve de-şifreleme için kullanılacak anahtar dizisinin, NIST kriterlerine tabi tutularak rasgeleliğin istatistiksel ölçüde sağlanıp sağlanmadığı kontrol edilmeye çalışılmıştır. Bu aşamada sınırlı sayıda bitlerden oluşan anahtar dizilerinin aksine yüksek yoğunlukta veri içeren(1 milyon adet bit) anahtar çıkışları elde edilmeye çalışılmıştır.

Söz konusu çıkış bit değerinin yüksek olması nedeniyle anahtar dizisine ait çıkış bitlerinin FPGA üzerinde gözlemlenmesi mümkün değildir. Bu nedenle kod yapısı içerisinde tampon bellek ve dosya yapısı kullanılmıştır. VHDL dili hem sentez hem de benzetim için kullanılabilir. Tümüyle benzetime uygun olduğu halde, bazı kodlar sentezlenebilir değildir. Dosya yapıları da FPGA yapıları üzerinde donanımsal karşılıklarının oluşturulamaması nedeniyle sentezlenemezler.

Sentezlenemeyen kod yapısı sadece benzetim ortamında çalıştırılarak çıkış bitleri, bir metin dosyasına kaydedilerek elde edilmiştir. Elde edilen metin dosyası NIST 800-22 test suiteine dahil edilerek rasgelelik değerleri ölçülmüş ve Tablo 4 ile Tablo 5' teki sonuçlar elde edilmiştir.

Tablo 4. İlk anahtar dizisine ait test sonuçları

Test	P- Değer	Sonuç
Frekans Testi	0.576	Başarılı
Blok Frekans Testi	0.709	Başarılı
Akış Testi	0.084	Başarılı
Blok İçindeki En Uzun Birler Testi	0.946	Başarılı
İkili Matris Rankı Testi	0.327	Başarılı
Ayrık Fourier Dönüşümü Testi	0.720	Başarılı
Örtüşmeyen Şablon Eşleştirme Testi	0.532	Başarılı
Örtüşen Şablon Eşleştirme Testi	0.466	Başarılı
Maurer'in Evrensel İstatistik Testi	0.129	Başarılı
Doğrusal Kar. Testi	0.907	Başarılı
Seri Testi	0.193	Başarılı
	0.552	Başarılı
Yaklaşık Entropi Testi	0.387	Başarılı
Kümülatif Toplam Testi	0.616	Başarılı

Tablo 5. İkinci anahtar dizisine ait test sonuçları

Test	P- Değer	Sonuç
Frekans Testi	0.602	Başarılı
Blok Frekans Testi	0.870	Başarılı
Akış Testi	0.694	Başarılı
Blok İçindeki En Uzun Birler Testi	0.659	Başarılı
İkili Matris Rankı Testi	0.368	Başarılı
Ayrık Fourier Dönüşümü Testi	0.143	Başarılı
Örtüşmeyen Şablon Eşleştirme Testi	0.032	Başarılı
Örtüşen Şablon Eşleştirme Testi	0.764	Başarılı
Maurer'in Evrensel İstatistik Testi	0.624	Başarılı
Doğrusal Kar. Testi	0.427	Başarılı
Seri Testi	0.281	Başarılı
	0.542	Başarılı
Yaklaşık Entropi Testi	0.883	Başarılı
Kümülatif Toplam Testi	0.301	Başarılı

6. Sonuçlar

Bu çalışma kapsamında, şimdiye kadar başarıya ulaşmış analitik bir saldırının gözlemlenmediği LFSR tabanlı Trivium akış şifreleme algoritması, Altera – Quartus II ortamında VHDL donanım tanımlama dili yardımıyla modellenmiştir. Diğer LFSR tabanlı şifreleme algoritmalarında olduğu gibi başlangıç değerlerine ihtiyaç duyan Trivium akış şifreleme algoritmasının seçilen parametreler doğrultusunda elde edilen anahtar dizileri istatistiksel testlere tabi tutularak rastgelelikleri ölçülmüş ve değişimleri incelenmiştir. Çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar algoritmanın kendisi ile sonuçlarının analizi olmak üzere iki ayrı aşamada değerlendirilmiştir.

Diğer donanım tabanlı yaklaşımlar gibi kendi içerisinde sözde rastgele sayı üreticilerini kullanan Trivium akış şifreleme algoritması, bilgisayar kaynaklarının(enerji tüketimleri, hafıza boyutları ve işlemci performansları) sınırlı olduğu durumlarda daha az karmaşıklık içeren yapısı ve paralel işleme tekniklerinin kullanıldığı donanımsal yapılar üzerinde gerçeklemeye yatkın bir algoritmadır. Algoritma bu yönüyle şifreleme işlemleri için hızlı ve efektif çözümler üretebilmektedir. Anahtar dizilerini, yazılımsal çözümlere göre düşük maliyetle üretebilen Trivium algoritmasında, anahtar dizilerine ait periyodun mümkün olduğunca uzun tutulması ve her periyot için farklı bir tohum/gizli anahtar değerinin kullanılması gerekmektedir. Ayrıca rasgeleliğe kaynak oluşturan ve algoritmanın üzerine kurulu olduğu tohum anahtar değerinin, olabildiğince rastgele dağılıma sahip olması ve LFSR yapısının güncellemeyle oluşan iç durumlarının mutlaka gizli kalması algoritmanın güvenilirliği konusunda belirleyici öneme sahiptir. Yeterince kompleks olması istenen çıkış ve geçiş fonksiyonlarının karmaşıklık seviyesinin artırılması için Trivium içerisine sonlu bir küme içerisinden ek girdiler(genelde kaotik davranış sergileyen) dahil edilebilir. Ek girdiler, herhangi bir sözde rasgele sayı üreticinin kriptografik açıdan daha güvenilir hale dönüştürür. Üretici hibrit bir yapıya dönüştüren ek girdiler kullanılarak çıkışta elde edilen sayıların istatistiksel kaliteleri artırılabilir. Ayrıca

çekirdek iç durumların veya tohum değerin bilinmesi durumunda üreteç çıkışlarının yüksek doğrulukla tahmin edilmesinin önüne de geçilebilir.

İkinci aşamada algoritmanın çalıştırılmasıyla elde edilen yüksek yoğunluktaki rastgele görünümlü anahtar dizilerinin, rasgelelikleri üzerindeki sapmalar ölçülerek kriptografik uygulamalar için uygunlukları incelenmiştir. Bu amaçla NIST 800-22 yazılım stütinde elde edilen anahtar dizilerinin her bir kriter için α ve P-değer parametreleri dikkate alınmıştır. Kriptolojik uygulamalar için önem seviyesine karşılık gelen tipik α parametresi [0.001–0.01], başarımlı parametresi P-değeri ise [0–1] aralığında değişim göstermektedir. P-değer parametresinin 0 değeri için anahtar dizisinin rasgeleliğinden söz edilemezken, 1 değeri için ise anahtar dizisinin mükemmel rasgeleliğe sahip olduğu kabul edilir. Anahtar dizilerinin kriptolojik uygunluğu için P-değer parametresinin daima α parametresinden büyük olması gerek şarttır, fakat yeter şart değildir.

Zira rasgele sayılar için rasgelelik kavramının, sayı dizisinin boyutunun artışıyla bağlı olarak matematiksel olarak kanıtlanması oldukça zordur. Bu nedenle rasgele sayılar için kriptografik yeterliliğin odak noktası hipotez tabanlı istatistiksel analize dayalı yaklaşımlar olup bu amaçla geliştirilmiş pek çok test yazılımı bulunmaktadır. Fakat testlerde kaçınılmaz hata payının bulunabileceği ve bu nedenle sonuçların test gruplarına göre değişebileceği unutulmamalıdır. Herhangi bir test grubu için kriterlerin tümünün başarımlı sayı dizisinin kriptografik uygunluğu için bazen yeterli olmayabilir. Bu doğrultuda üreteçler veya rasgele sayı dizileri hakkında yorum yapmak için test sonuçları dikkatli incelenmeli ve mümkünse geçerliliği yüksek olan testler kullanılmalıdır.

İki farklı tohum değere karşılık elde edilen anahtar dizileri için ölçüm sonuçları Tablo 4 ve Tablo 5’te verilmiştir. Değişen tohum değerleriyle birlikte elde edilen anahtar dizilerinin her bir kriter için ölçülen rasgelelik değerlerinin değiştiği görülmüştür. Bu haliyle her bir kriter için elde edilen test sonuçlarına ait P-değer başarımlı parametresinin α parametresinden büyük olduğu ve kriptolojik

uygulamalar için gerekli rasgelelik kalitesinin sağlandığı görülmektedir. Her iki anahtar değeri için test sonuçlarına bakıldığında başarımlı parametrelerinin kimi kriterler için düşük olduğu bu durumun gerek algoritmanın deterministik yapısından gerekse tohum değerin rasgelelik anlamında olasılıksal dağılımından kaynaklanmaktadır. Ayrıca deneme yanılma yoluyla girdi parametresi olarak kullanılan bazı tohum anahtar dizileri için çıkışta rasgeleliğin sağlanamadığı görülmüştür. Tohum anahtar değerlerin mutlak gizliliğinin yanı sıra rastgele dağılıma sahip olmaları durumu sonuçların ve algoritmanın başarımlı oranını artırır.

7. Kaynaklar

1. Özkaynak, F. (2015). Kriptolojik Rasgele Sayı Üreteçleri. *Türkiye Bilişim Vakfı Bilgisayar Bilimleri ve Mühendisliği Dergisi*, 8-2.
2. Garcia-Bosque, M., Perez, A., Sanchez-Azqueta, C., Celma, S. (2016). MEMS-Based Seed Generator Applied to a Chaotic Stream Cipher. *Proc. SPIE Microtechnologies*, Barcelona.
3. Koç, Ç. (2009) Cryptographic Engineering, Springer-Verlag.
4. Çakır, B. (2012). Akış Şifreleme Algoritmalarının Karşılaştırmalı Olarak İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
5. Sakallı, M. T., Buluş, E., Şahin, E., Büyüksaraçoğlu, F. (2007). Akış Şifrelerinde Tasarım Teknikleri ve Güç İncelemesi. *Akademik Bilişim Sempozyumu*, Kütahya.
6. Gürnlü, B. (2017). Trivium Çipier(Trivium Dizi Şifreleme Algoritması). Erişim: <http://bilgisayarkavramlari.sadievrenseker.com/2009/06/10/trivium-cipher-trivium-dizi-sifreleme-algoritmasi/>.
7. Kitsos, P., Sklavos, N., Provelengios, G., Skodras, A. N. (2012). FPGA-based Performance Analysis of Stream Chipers ZUC, Snow3g, Grain V1, Mickey V2, Trivium and E0. *Microprocessors and Microsystems*.
8. Avaroğlu, E., Tuncer, T., Ozer, A.B., Türk, M. (2014). A New Method for Hybrid Pseudo Random Number Generator. *J Micro- Electron Electron Compon Mater* 44: 303-311.
9. Kaplan, T. (2006). Trivium Dizi Şifreleme Algoritmasının FPGA Üzerinde Gerçeklenmesi. Bitirme Tezi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği İstanbul Teknik Üniversitesi.

10. Agren, M., Hell, M., Johansson, T., Meier, W. (2017). A New Version of Grain-128 with Authentication. In *ECRYPT Symmetric Key Encryption Workshop 2011*, Available at <http://skew2011.mat.dtu.dk/>.
11. Babbage, S., Dodd, M. (2017). The Stream Cipher MICKEY 2.0, ECRYPT Stream Cipher, Available at http://www.ecrypt.eu.org/stream/p3ciphers/mickey/mickey_p3.pdf
12. Bulens, P., Kalach, K., Standaert, F., Quisquater, J. (2007). FPGA Implementations of eSTREAM Phase-2 Focus Candidates with Hardware Profile. *Technical Report 2007/024, ECRYPT eSTREAM*.
13. Schaumont, P. R. (2010). Trivium Crypto-Coprocessor. *A Practical Introduction to Hardware/Software Codesign*. pp 337-368.
14. Mukherjee, P. (2013). *An Overview of eSTREAM Ciphers*, Centre of Excellence in Cryptology Indian Statistical Institute, Kolkata, India.
15. Yun, J., Park, K., Shin, Y., Kim, H. (2017). An efficient stream cipher for resistive RAM, *IEICE Electronics Express*, Vol.14, No.7, 1–6 (DOI: 10.1587/elex.14.20170179).
16. Cannière, C. D., Preneel, B. (2008). The Stream Cipher Trivium, eSTREAM, the ECRYPT Stream Project Available at: http://www.ecrypt.eu.org/stream/trivium_p3, 2017.
17. Paar, C., Pelzl, J. (2010). *Understanding Cryptography: A Textbook for Students and Practitioners*, Springer.
18. Cannière, C. D., Preneel, B. (2006). Trivium – A Stream Cipher Construction Inspired by Block Cipher Design Principles. ECRYPT Stream Cipher, Available at <http://www.ecrypt.eu.org/stream/papersdir/2006/021.pdf>, 2017.
19. Sarıtaş, E., Karataş, S. (2015). *Her Yönüyle FPGA ve VHDL*. 1. Basım, Palme Yayıncılık Ankara.

Isıl Çevrim Uygulanmış Al-Bronz Alaşımında Mikroyapı ve Aşınma Özelliklerinin Araştırılması

Zülküf Balalan¹, Furkan Sarsılmaz²

¹Bingöl Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü

²Fırat Üniversitesi Mekatronik Mühendisliği Bölümü
zbalalan34@gmail.com

(Geliş/Received: 05.04.2017; Kabul/Accepted: 10.05.2017)

Özet

Bu çalışmada yaygın olarak deniz ve gemi inşaatında yatak ve burç malzemesi olarak kullanılan alüminyum bronz (CuAl10Fe) alaşımı numunelerine suni yaşlandırma işlemi yapılmıştır. Numuneler, 950 °C de ısıtılma fırınında 30 dakika bekletilerek 100 ve 150 °C sıcaklıklarda 8-10-12 saatlik periyotlarda ısıtılma çevrimlere maruz bırakılmışlardır. Daha sonra işlem görmüş numunelerde mikroyapısal dönüşüme bağlı olarak değişen sertlik ve aşınma direnci verileri, yaşlandırma işlemi uygulanmayan esas numune ile karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak yaşlandırma uygulanmış numunelerin işlem görmeyen malzemeye kıyasla sertlik ve aşınma direnci kabiliyetinde önemli miktarda artış meydana geldiği belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Al bronz, Aşınma, Mikrosertlik.

The Investigation of Tribological and Microstructural Properties of Thermal Cycles Applied Al-Bronze Alloys

Abstract

In this work, thermal cycles were applied to samples of CuAl10Fe aluminum bronze alloy which are commonly used in marine hardware, shipping and journal bearings. The samples were maintained in heat treatment furnace at 950 °C (for 30 minutes) and cooled after than subjected to aging process by storing in heat treatment furnace (at 100 °C and 150 °C) for different times (8, 10 and 12 hours). Therefore, aged samples of the data on microhardness and wear resistance values were compared to non-aged base sample depending on the microstructural transformation. As a consequence of this, there is an important increasing at aged samples of microhardness and wear resistance values when comparing with non-aged base sample.

Keywords: Al bronze, Wear, Microhardness.

1. Giriş

Günümüzde imalat endüstrisi her geçen yıl demirdışı metal alaşımı üretim kapasitesini artırırken bu alaşımlar içinde bakır ve alaşımlarına olan talep de artmaktadır[1]. Endüstride en yaygın kullanım alanı bulan metallerin başında bakır alaşımları gelmektedir. Saf bakıra alüminyum, nikel, demir, kurşun, mangan, kobalt, silisyum, gümüş, kalay, berilyum ve zirkonyum gibi elementler tek olarak veya bu elementlerin birlikte oluşturdukları alaşımlar ilave edilebilmektedirler. Bu alaşım elementlerinin saf bakıra katkısı ile işlem şartlarına bağlı olarak mekanik, kimyasal ve fiziksel özelliklerin geliştirilmesi mümkün olabilmektedir[2]. Bu alaşımlar sektörde üstün ısı ve elektriksel iletkenlik özellikleri göstermesinin

yanında çok iyi aşınma ve yağlayıcılık özelliklerine de sahip olmaları nedeniyle pek çok tribolojik uygulamalarda kullanılmaktadır[1,2]. Demir ve çelik endüstrisinde en yaygın kullanım alanı bulan bakır alaşımlarından biri de yatak malzemesi olarak çoğunlukla tercih edilen bronz alaşımlarıdır[3]. En yaygın tercih edilen yatak malzemeleri alüminyum ile bakırın birlikte oluşturdukları alüminyum bronzundan yapılmaktadır. Bu alaşımlarda ana alaşım elemanı alüminyum elementinin yanında demir, nikel silisyum ve mangan elementleri bulunmaktadır. Özellikle %2-4 arası demir içeren alüminyum bronzları ötektoid dönüşüm noktasının sıcaklığını düşürürken %3 e kadar nikel ilavesiyle de mekanik özellikler oldukça iyileştirilebilmektedir[4]. Özellikle endüstrinin çok kullandığı CuAl10Fe alaşımları buna örnek olarak verilebilir. Bu

malzemelerden üretilmiş yataklar yüksek darbe ve aşınma dayanımına sahiptir. Bu alaşımlar yüksek sıcaklıklarda mukavemetlerini korur ve 250° C üzerinde çalışan ekipman yataklarında yağlamanın yeterli olduğu, yüksek yük ve düşük hız uygulamalarında daha çok tercih edilirler [5-7]. Ayrıca bu alaşımın diğer Al-bronzlarına kıyasla önemli bir özelliği de nikel ve demir katkıları ile iç yapıda soğuma esnasında istenmeyen ikincil bileşik fazların oluşumunu engellemesidir. Bununla birlikte bakır alaşımlarına alaşım elemanı katkılarının ilavesiyle birlikte mukavemet artışı sağlanırken, diğer yandan çökeltme sertleştirilmesi (yaşlandırma) ile de maksimum sertlik, mukavemet ve tokluk gibi mekanik özelliklere ek olarak iyi korozyon ve aşınma dirençleri arttırılabilmektedir[7,8].

Bu nedenle çalışmamızda CuAl10Fe alüminyum bronzunun endüstride yaygın kullanımı göz önüne alınarak mevcut alaşımın performanslarının belirlenmesi ve karşılaştırılması hedeflenmiştir. Al,Fe,Mn ve Ni elementlerini içeren alüminyum bronzları yüksek sertlik özellikleri sergilerler. Ancak mekanik özelliklerinin de belirli bir ömür süreleri bulunmaktadır. Bu ömür sürelerini aşınma direncinin iyileştirilmesiyle arttırmak mümkündür. Bu sebeple CuAl10Fe alaşımının aşınma kabiliyetinin iyileştirilebilmesi amacıyla çeşitli sıcaklıklarda suni yaşlandırma ısı işlemleri uygulanmış ve bu amaçla alaşımda mikro yapı, mekanik özellikler ve aşınma özellikleri araştırılmıştır.

2. Materyal ve Metot

Deneyisel çalışmada, Tablo 1. de kimyasal içeriği verilen CuAl10Fe alüminyum bronzu ticari olarak temin edilmiştir. Deneyisel çalışmada kullanılan alüminyum bronzu alaşımlarına daha önceden herhangi bir ısı işlem uygulanmamıştır. Bu alaşımlar 20 mm çapında ve 8 mm yüksekliğinde kesilerek yaşlandırma öncesi yüzeyleri temizlenip metalografik olarak elmas pasta ile parlatılmış ve asit solüsyonu ile dağlanmıştır. Yaşlandırma öncesi numunelerin baz numune üzerinden esas mikroyapı fotoğrafları elektron mikroskobu yardımıyla belirlenmiştir. Daha sonra numuneler, 950 °C de ısı işlem fırınında 30 dakika bekletilerek hızla

oda sıcaklığına soğutulmuş ve akabinde Tablo 2 de verilen sıcaklık (100 ve 150 °C) ve sürelerde (8-10-12 saat) altı adet numuneye ısı işlem fırınında argon gazı altında ısı çevrimler uygulanmıştır. Aşağıdaki tabloda yaşlandırma işlemi uygulanan numunelere ait bekleme süresi ve sıcaklık değerleri görülmektedir (Tablo 2). Bütün suni yaşlandırma işlemleri sıcaklık ve zaman kontrollü ısı işlem fırınında (Protherm marka) yapılmıştır. Deneyisel çalışmada seçilen yaşlandırma işlemine ilişkin parametreler literatür ışığında elde edilen verilerle incelenerek ve yorumlanarak seçilmiştir [6-8]. Yaşlandırma işlemi uygulanan bu numunelere mekanik sertlik testleri ve aşınma testleri uygulanmıştır. Deneyde kullanılan sertlik ve aşınma deney numuneleri, farklı parametrelerde yaşlandırma yapılan numunelerden seçilerek standartlara uygun olarak hazırlanmıştır. Her farklı yaşlandırma süresi için en az üç numune seçilerek bu numuneler üzerinde ilgili testler/deney yapılarak ortalama veriler elde edilmiştir. Farklı yaşlandırma parametreleri uygulanan numunelerin mikrosertlik testleri için öncelikle yüzeyleri 120-1200 gritlik zımparalarla zımparalanarak temizlenmiş ve parlatılmıştır[9]. Daha sonra numunelerin yüzeylerinde 1 mm eşit aralıklarla 6 farklı noktadan ölçüm yapılmış ve sertlik test grafikleri elde edilmiştir. Mikrosertlik testleri Vickers MHT 10 tipi mikrosertlik ölçüm test cihazıyla 5 gr yük ve 10 saniye bekleme süresi altında yapılmıştır.

Aşınma deneyleri oda sıcaklığında pin on disk tipi test cihazı kullanılarak kuru ortam şartlarına göre adhesiv olarak gerçekleştirilmiştir. Deneylerde 10 mm çapında ve 40 mm uzunluğundaki silindirik geometride numuneler kullanılmıştır. Deneyde aşındırıcı karşı malzeme olarak SAE 1050 çelik çeliğinden disk kullanılmıştır. Tablo 3'de SAE 1050 çelik aşındırıcıya ait kimyasal içerik verilmiştir. Aşındırıcı disk, genişliği 100mm çapında ve 5mm kalınlığında torna tezgâhında imal edilmiş ve ardından yüzeyleri taşlanmıştır. Numunelerin alın yüzeyleri ise 1200 gritlik zımpara ile zımparalanarak, her iki temas yüzeyler asetonla temizlenmiş ve kurutulmuştur. Tablo 4'de ise aşınma işlemlerinde kullanılan numunelerin test parametreleri verilmiştir. Aşınma deneyleri torna tezgâhında 190 dev/dak'lık sabit bir devirde ve toplam aşınma yolu 500 m olarak deney numuneleri üzerine sırasıyla 30 N, 60 N' luk

yükler uygulanmış olup, deney numuneleri her 50 m aşınma yolu sonunda sökülüp yüzeyindeki aşınma artık partikül ve tozlar alkol ile temizlenmiş ve 10^{-4} hassasiyetli elektronik bir terazi yardımıyla ağırlık kayıpları tespit edilmiştir. Ayrıca numunelerin aşınmış yüzeylerinin modifikasyonları SEM ile incelenmiş ve yüzey fotoğrafları alınmıştır. Aşınma işlemleri sonrası numunelerin ağırlık kayıpları belirlenerek (ΔG), tipik aşınma oranları (W_a) hesaplanmıştır.

$$W_a = \frac{\Delta G}{dMs} = (m^3/Nm)$$

Burada; W_a : Aşınma Oranı, ΔG : ağırlık kaybı (gr), s : kayma mesafesi, M : Uygulanan yük, ve d : malzemenin yoğunluğu olarak belirlenmiştir [10].

Tablo 1. Deney çalışmalarında kullanılan malzemelerin kimyasal içerikleri

Malzeme	Alaşım Elementleri,% Ağırlık				
	Al	Fe	Mn	Ni	Cu
CuAl10Fe	8-11	2-4	1	3	Kalan

Tablo 2. CuAl10Fe alaşıma uygulanan ısı çevrimleri

Numune No	Yaşlandırma Sıcaklığı	Yaşlandırma Süresi
N1	150	8
N2	150	10
N3	150	12
N4	100	8
N5	100	10
N6	100	12

Tablo 3. SAE 1050 çelik mile ait milin kimyasal bileşenleri

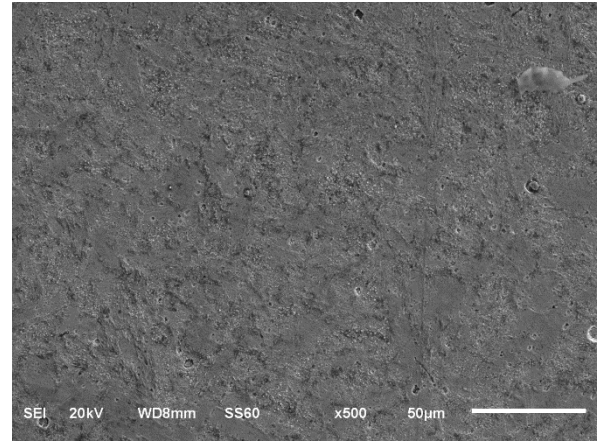
Malzeme	Alaşım Elementleri,% Ağırlık					
	C	Si	Mn	P	S	Fe
SAE 1050	0,51	0,25	0,75	0,04	0,05	Kalan

3. Deneyel Sonuçlar ve Tartışma

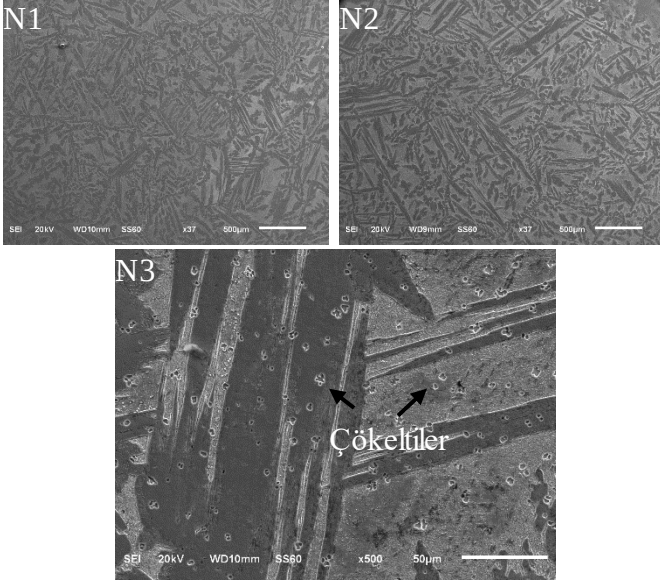
3.1 Mikroyapı incelemeleri

Endüstriyel alüminyum bronzlarının tane yapısını inceltmek, sertliği ve dayanımı arttırmak için %1-4 arasında Fe ilave edilmektedir. %8-10 Al içeren bu malzemelerde bileşimde % 3-5 arasında Ni bulunmadığı takdirde ısı işlem

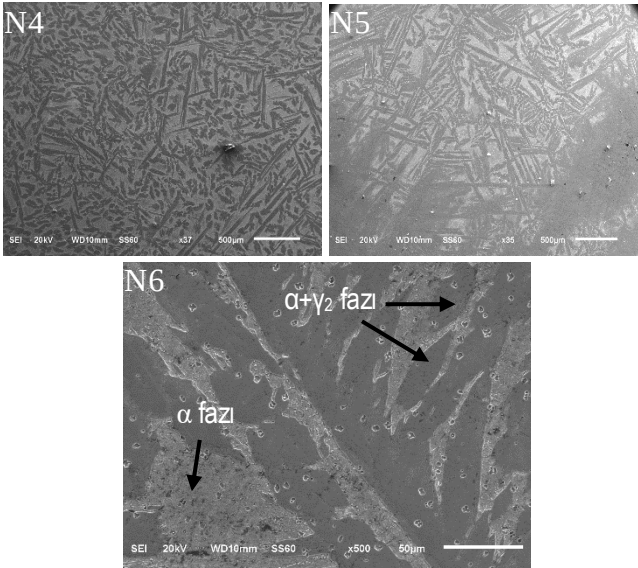
yapmak mümkün değildir.[4]. Bu nedenle alüminyum bronzları içerisinde nikel-alüminyum alaşımlarının özel bir yeri bulunmaktadır. Bu malzemelerde mikro yapıda uygulanan ısı işleme bağlı olarak α ve β fazları bulunmaktadır. Ancak ısı işlem sıcaklığından yavaş soğutma ile 565 °C de β fazı dönüşüme uğratarak $\alpha+\gamma_2$ yapısına dönüşür ve bu yapı oda sıcaklığına kadar devam eder. γ_2 fazı gevrek ve kırılğan bir faz olduğundan Al bronzlarında istenmez. β fazının engellenmesi için alaşım, ötektoid sıcaklığının üstüne kadar ısıtılır ve bu sıcaklıkta çok hızlı soğutma işlemi uygulanır[4,5]. Böylece faz dönüşümü engellenerek alaşım yapısı oda sıcaklığına kadar α ve β olarak kendini korumaktadır. Bu nedenle özellikle CuAl10Fe bronzları için çalışmamızda I. aşama yaşlandırma işlemlerinde hızlı soğutma işlemi uygulanmıştır. Aşağıdaki şekilde yaşlandırma işlemi uygulanmamış CuAl10Fe alaşıma ait SEM fotoğrafından alaşımın oldukça ince taneli bir yapıda olduğu görülmektedir.



Şekil 1. Yaşlandırma yapılmayan baz CuAl10Fe alaşıma ait SEM mikroyapı fotoğrafı



Şekil 2. 150 °C de yaşlandırma yapılan N1,N2,N3 numunelerine ait SEM mikroyapı fotoğrafı



Şekil 3. 100 °C de yaşlandırma yapılan N4,N5,N6 numunelerine ait SEM mikroyapı fotoğrafı

Yaşlandırma işlemi sonrası numunelerde oluşan mikroyapısal dönüşümler Şekil 2 ve Şekil 3 de sırasıyla verilmiştir. Yaşlandırma işlemi yapılmayan numune ile karşılaştırıldığında bütün resimlerde hızlı soğuma işleminden kalan α fazında Fe içeriğine bağlı martenzit dönüşümünün kalıntılarına rastlanmıştır. Bu durum yaşlandırma sıcaklığının yeterli olmaması nedeniyle α fazında çubuk formdaki martenzitin, daha küresel $\alpha+\beta$ fazına dönüşmemesine bağlı

olduğu düşünülmektedir. Ancak mikroyapıda martenzit çubuklardan ayrılan ve çökelti özelliği gösteren küçük ada şeklindeki $\alpha+\gamma_2$ fazlı yapıların varlığı görülmektedir. Numunelerin yaşlandırma sıcaklığı irdelendiğinde 100 °C ile 150 °C arasında çok bariz bir yapısal dönüşüm farkının görülmeyişi ancak bekleme süreleri kendi sıcaklık grubunda değerlendirildiğinde 12 saatlik bekleme süresiyle tane yapılarının ve çökelti miktarlarının gözle görülür düzeyde değişim gösterdiği tespit edilmiştir.

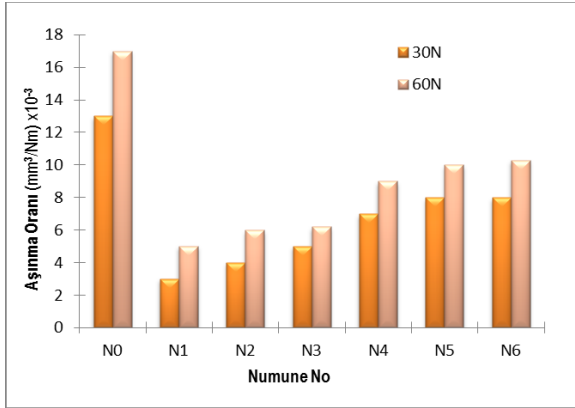
3.2 Aşınma ve mikrosertlik incelemeleri

Aşınma deneylerinde, her bir numunenin aşınma miktarları, iki farklı yük ve altı farklı yaşlanma şartlarına göre incelenmiştir. Her bir kaymalı yatak numunesine uygulanan yük ve numunelerde oluşan ağırlık kaybına bağlı aşınma oranları (W_a) yaşlanma uygulanmayan esas malzemeye ve yaşlanma uygulanan numunelere göre değişimi Şekil 4’de verilmiştir.

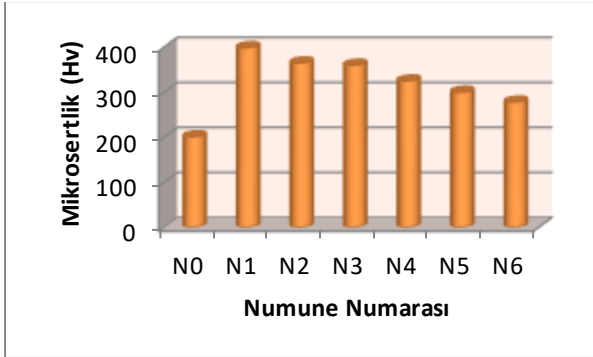
Bütün numunelerin yük miktarı arttıkça ağırlık kaybının arttığı gözlemlenmiştir. Genel olarak en yüksek ağırlık kaybının 60 N yükte, 100 °C de 12 saat bekleme süresi altında yaşlandırma yapılan N6 numunesinde gerçekleştiği belirlenmiştir. Her numunenin farklı yaşlanma şartları altında malzeme kaybı, uygulanan yükün artmasıyla lineer olarak artmaktadır. Yüksek yükte kuru ortam çalışma şartlarının da etkisiyle yatağın sıcaklığın artması yatağın yük taşıma kapasitesini azaltmaktadır. Sürtünme sonucu oluşan sıcaklık ve basıncın etkisiyle numune temas yüzeylerinden kopan malzeme miktarları yüksek ağırlık kayıplarına neden olmuştur. Bu nedenle kaymalı yataklarda uygun basınç ve yük değerinin seçilmesi önemli bir faktör olduğu açıktır.

Şekil 4’de görüldüğü gibi iki farklı yaşlanma sıcaklıkları, birbiriyle karşılaştırıldığında 150 °C de yaşlandırma yapılan numunelerin aşınma ağırlık kayıpları ve aşınma oranının, 100 °C de yaşlandırma yapılan numunelere kıyasla bir miktar azaldığı ve buna karşın mikrosertlik değerlerinin yükseldiği görülmüştür. Bununla birlikte esas baz malzemeye göre de yaşlandırma etkisinin önemli derecede ağırlık kayıplarını azaltarak mikrosertlik değerlerini yükselttiği kolayca fark edilmektedir (Şekil 5) Ayrıca bütün numunelerin 8, 10 ve 12 saatlik üç farklı yaşlandırma sürelerinin artışı ile birlikte

numunelerdeki kütle kaybı da artmaktadır. Bu durum 8 saatlik yaşlandırma süresinin üzerindeki sıcaklıklarda malzemenin genel mukavemet karakteri üzerinde olumsuz etkiye yol açtığı söylenebilir. Aynı sıcaklıkta tutulan numunelerde yaşlandırma sürelerinin artmasıyla beraber mikrosertlik değerlerinin de düşüş gösterdiği Şekil 5 den görülmektedir. Bu aşamada elde edilen aşınma kaybı miktarları ile mikrosertlik ölçümleri sonuçları birbirini destekler niteliktedir.



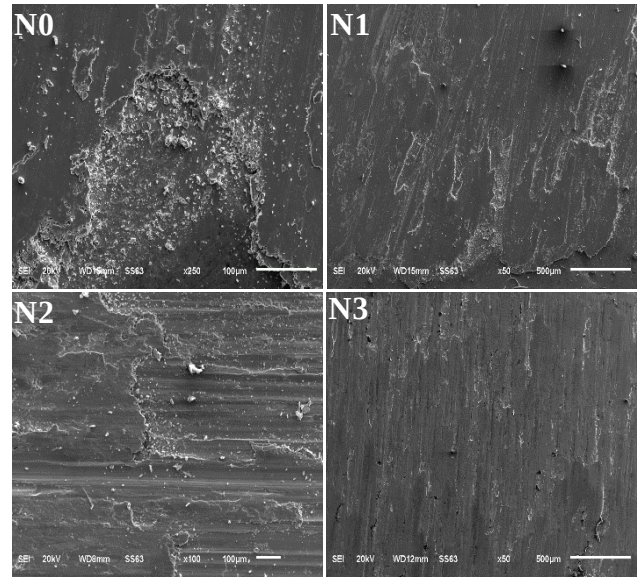
Şekil 4. Numunelere uygulanan ısı çevrim sonucu oluşan aşınma oranları (Wa)



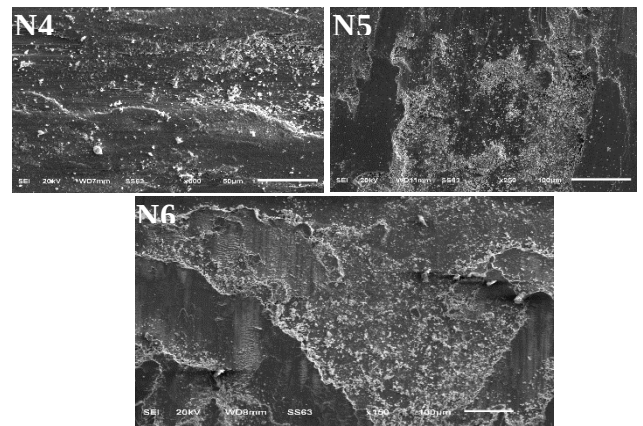
Şekil 5. Numunelerin mikrosertlik değerleri

Bütün numunelerin aşınma yüzey fotoğraflarının SEM görüntüleri Şekil 6 ve Şekil 7 de sırasıyla verilmiştir. Numunelerin farklı deney parametreleri altında (yaşlanma süresi, sıcaklığı ve yüklerde) gerçekleştirilen aşınma testi sonucunda çıkan SEM görüntülerinden, sürtünme yüzeylerinde farklı derinliklerde aşınma çizikleri net olarak görülebilmektedir. Şekil 6 da özellikle yaşlandırma uygulanmayan N0 numaralı numunede diğer numunelere kıyasla aşınma çiziklerinin derinliğinin arttığı gözlenmiştir. Bu durum numunelerden elde edilen aşınma oranları değerlerindeki değişimin

bir sonucu olduğu düşünülmektedir. Ayrıca bütün numunelerin aşınma yüzeyleri karşılaştırıldığında, aşınma verileri ve mikrosertlik verilerine paralel, aşınma yüzey çiziklerinin 150 °C de daha yüzeyel derinlikte ve daha az debris içerdiği fotoğraflardan görülmektedir. Bu durum ise özellikle 150 °C de ve düşük bekleme sürelerinde aşındırma yapılan numunelerin karşılık mil üzerindeki etkisinin az olduğunu dolayısıyla mili daha az aşındırdığını söyleyebiliriz.



Şekil 6. Yaşlanma yapılmayan (N0) ve 150 °C de yaşlandırma uygulanan (N1, N2 ve N3) numunelerin aşınma yüzeyi SEM görüntüleri



Şekil 7. 100 °C de yaşlandırma uygulanan (N4, N5 ve N6) numunelerin aşınma yüzeyi SEM görüntüleri

4. Genel Sonuçlar

Yapılan bütün deneyler sonucunda farklı yaşlanma şartları altında CuAl10Fe alaşımının mikroyapı ve mekanik aşınma özellikleri incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. Buna göre elde edilen sonuçlarla beraber kaymalı yatakların aşınma özellikleri hakkında aşağıdaki sonuçlara varılmıştır.

- 1.) Yaşlandırma yapılan ve yapılmayan CuAl10Fe alaşımlarında, uygulanan yük arttıkça ağırlık kayıplarının arttığı ve buna bağlı olarak bulunan aşınma oranlarının W_a arttığı tespit edilmiştir. En yüksek aşınma oranı değeri yaşlandırma yapılmayan numune dışında 100 °C de 12 saat bekleme süresinde yaşlandırılan N6 numunesinde % 10,2 olarak belirlenmiştir.
- 2.) İki farklı sıcaklık altında yapılan yaşlandırma işlemleri birbiriyle karşılaştırıldığında 100 °C ile yaşlandırılan numunelerin 150 °C da yaşlandırılan numunelere göre daha fazla kütle kaybına maruz kaldığı belirlenmiştir. 150 °C de, β fazının dönüşümü ile intermetalik bileşiklerin çökmesi içyapıda mukavemet artışına neden olmaktadır. Buna karşın, aşırı uzun bekleme süreleri ise içyapıda çökelti miktarını azaltarak yaşlandırma işlemlerinden istenen sertlik ve aşınma dirençlerini sağlamadığı görülmüştür. Bu nedenle en yüksek mikrosertlik değerleri N1 numunede 390 hv olarak elde edilmiştir.
- 3.) Numunelerin aşınma testi sonucunda elde edilen SEM görüntülerinden, sürtünme yüzeylerinde farklı derinliklerde aşınma izleri net olarak belirlenmiştir. Yaşlandırma uygulanmayan N0 numaralı numunede diğer numunelere kıyasla aşınma yüzey tabakası derinliğinin arttığı belirlenmiştir. Numunelerin aşınma oranlarının artışına paralel aşınma iz derinliklerinin arttığı net olarak anlaşılmaktadır. Bu durum

numunelerden elde edilen aşınma oranları değerlerindeki değişimin bir sonucu olduğu düşünülmektedir. Bu aşamada elde edilen aşınma kaybı miktarları, mikrosertlik ölçümleri sonuçları ve aşınma iz derinliği birbirini destekler niteliktedir.

5. Kaynaklar

1. Ünlü, B. S., Köksal, N. S., Atik, E., Meriç, C. (2005). CuSn10 yatak malzemesinin tribolojik özelliklerinin incelenmesi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, **11** (1), 41-45.
2. Özçelik, S. (2007). Cu ve Fe esaslı t/m yatak malzemelerinin aşınma özelliklerinin deneysel incelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya
3. Atik, E., Ünlü, B. S., Meriç, C. (2001). Radyal Kaymalı Yatak Aşınması Deney Cihazı Tasarımı. *Makine Malzemeleri ve Teknolojisi (MAMTEK) Sempozyumu*, Manisa, 98-103.
4. Ünal M. (1999). Alüminyum Bronzunda Farklı Katılama Hızlarının Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerine Etkisi. *Doktora Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
5. Koçak, T.Ü., Yanar, H., Pürçek, G., Birol, F. (2014). Bir nikel alüminyum bronz (CuAl10Ni5Fe4) ile kalay bronzunun (CuSn11) sürtünme ve aşınma özellikleri açısından karşılaştırılması. *2.Uluslararası Demir Çelik Sempozyumu (IISS'15)*, Karabük, Türkiye.
6. Thossatheppitak, B., Suranuntchai, S., Uthaisangsuk, V., Manonukul, A., Mugsuntisuk, P. (2014). Microstructure evolution of nickel aluminum bronze alloy during compression at elevated temperatures: *Advanced Materials Research*, **893**, 365-370.
7. Ping, H., Lopez, H.F., E. Athermal (1999). Martensite in a Co-Cr-Mo Alloy: Grain Size Effects. *Materials Letters* **39** 249-253.
8. Davim, P. J. (2000). An Experimental Study of the Tribological Behaviour of the Brass/Steel Pair: *Materials Processing Technology*, **100** 273-277.
9. Varol, R. (2001). Cu ve Fe Esaslı T/M Yatak Malzemelerinin Aşınma Özellikleri: *DEÜ Müh. Fak. Fen ve Müh. Dergisi*, **3**, 81-90.
10. Özdemir, N., Sarsılmaz, F., Orhan, N. (2008). The Effect of Cementite Size and Morphology on the Abrasive Wear Behavior of UHC Steel: *Journal of Tribology, ASME* **130**, 021602.1- 021602.5.

Transformatörde Polaritenin Önemi ve Deneysel Olarak Belirlenmesi

Hüseyin ALTUN

Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Elazığ.
haltun@firat.edu.tr

(Geliş/Recieved: 10.04.2017; Kabul/Accepted: 10.07.2017)

Özet

Elektromanyetik bir sistem olarak transformatör, gerek bir fazlı veya 3-fazlı, gerekse de iki sargılı veya çok sargılı ve güç transformatörü veya ölçü transformatörü şeklinde birçok alanda geniş bir biçimde kullanıldığı aşikârdır. Elektriksel şekilde, anma değerleri bakımından koşullu olarak, kendi aralarında seri ya da paralel bağlantı durumunda ve elektriksel bağlantı şeklinin sistem ihtiyacını doğru karşılayabilmesi için transformatörlerin polaritesinin bilinmesi gerektiği noktasından hareketle, bu çalışmada transformatör polaritesinin bilinmesinin gerekliliği üzerinde durulmuş ve polarite tayini için kullanılan yöntemlerle ilgili derleme bilgi verilmiştir. Şekillerle destekli transformatör polaritesinin önemi üzerinde durulurken, polarite dikkate alınarak yapılacak bağlantıların daha iyi anlaşılabilmesi için, kullanılan şekillerde genellikle biri eksiltmeli transformatör (TR-I) ve diğeri eklemeli transformatör (TR-II) olarak ele alınmıştır.

Anahtar Kelimeler: Transformatör, Polarite, Polarite tayini, Transformatör bağlantıları.

The Importance of Polarity in a Transformer and Its Experimental Determination

Abstract

As an electromagnetic system, it is obvious that the transformer is widely used in many fields, either as a single-phase or 3-phase or as two windings or multi-winding and as a power or instrument transformer. For electrical connections in serial or parallel of power transformers under various conditions, and in case of the connections of instrument transformers which are used for measuring and control purposes, it is essential that the polarity is taken into account to meet the requirements of the system. In this study, necessity of the polarity of transformers is emphasized and review information about the methods used for the polarity determination is given. While emphasizing the importance of polarity, mostly in all given figures two transformers are used, one subtractive transformer (TR-I) and the other additive transformer (TR-II)

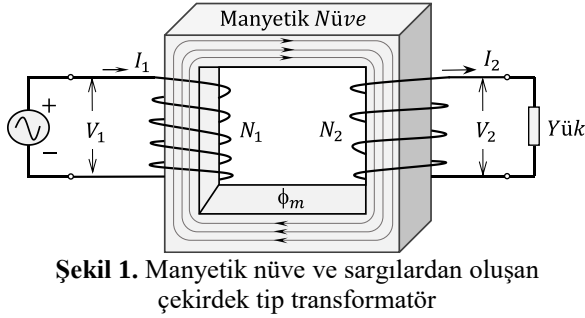
Keywords: Transformer, Polarity, Polarity determination, Transformer connections.

1. Giriş

Günümüzde transformatör güç sistemleri, güç elektroniği, ölçme tekniği ve haberleşme tekniği gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Genel olarak, Şekil-1'deki gibi manyetik bir nüve etrafında sarılan sargılardan oluşan transformatör endüksiyon yasasına göre, yani Faraday Yasasına göre çalışır. Enerji kaynağına bağlanan yanına “Primer” ve yüke enerji aktaran yanına “Sekonder” denilmektedir. Transformatör enerji dönüşümü yapmaz, enerji transferi yapan elektromanyetik bir sistemdir. Transformatör zamanla değişen bir gerilim kaynağından beslendiği sürece, zamanla değişen manyetik alan

kuvvet çizgilerinin sekonderi endüksiyon yasası yoluyla etkilediği için, sekonderde gerilim üretilmektedir ve bu gerilim kullanılarak bir yüke güç aktarılabilir. Nihai olarak primerin beslendiği AC kaynaktan çektiği elektrik gücü, manyetik kuvvet çizgileri yoluyla sekondere aktararak, sekondere bağlı yük empedansına yine elektrik gücü olarak iletilmektedir. Daha önce belirtildiği gibi çeşitli alanlarda kullanılan transformatörün, kullanıldığı alanda çeşitli güç ölçüm cihazlarıyla bağlantısını doğru bir şekilde yapabilmek önem arz etmektedir. Aynı zamanda birden fazla sayıda transformatör bir araya getirilerek bir yükün ihtiyaç duyduğu elektrik gücünü ve gerilim seviyesini temin edebilmek

için, bir araya getirilen transformatörlerin birbiriyle bağlantısını doğru bir şekilde yapabilmek, transformatörlerin polaritelerinin bilinmesine bağlıdır. Kısaca bir transformatörün başka güç ölçümü cihazlarıyla veya başka transformatörlerle bağlantısını doğru yapabilmek için polaritesinin deneysel olarak tayin edilmesi gerekir.

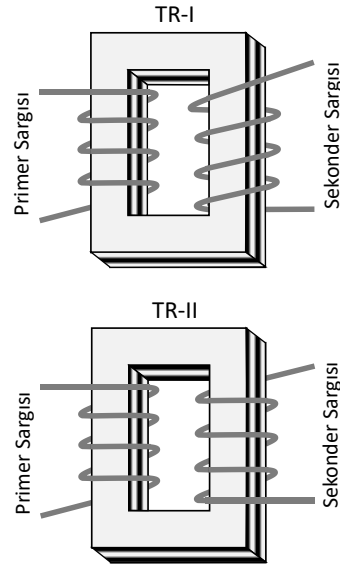


Şekil 1. Manyetik nüve ve sargılardan oluşan çekirdek tip transformatör

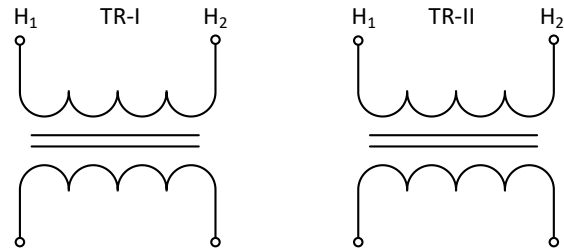
2. Transformatör Sargılarının Sarım Yönü

Şekil-2’de çekirdek tip iki adet tek fazlı transformatörün primer ile sekonder sargılarının sarım yönleri verilmektedir. Verilen her iki transformatörde de primer sargılarının sarım yönü aynı, ancak sekonder sargılarının sarım yönü zıttır. Her bir transformatör için sekonder sargısının sarım yönünün primer yana göre aynı yönde veya zıt yönde olması, sekonderde endüksiyon yoluyla üretilen gerilimin primer yana uygulanan gerilimle aynı fazda veya 180° faz farklı olması anlamına gelmektedir. Şekil-2’de verilen I nolu transformatörün sekonderinde endüklenen gerilim primer yana uygulanan gerilimle aynı fazda iken, II nolu transformatörün sekonderinde endüklenen gerilim ile primer yana uygulanan gerilim arasında 180° faz farkı bulunmaktadır. Bu nedenle I nolu transformatöre ‘Eksiltmeli’ (subtractive) transformatör ve II nolu transformatöre ‘Eklemeli’ (additive) transformatör denilmektedir. Bu isimlendirmeler sekonder geriliminin primer geriliminden küçük olduğu durumda transformatöre verilen “düşürücü transformatör” ve sekonder geriliminin primer geriliminden büyük olduğu durumda transformatöre verilen “yükseltici transformatör” şeklindeki isimlendirmelerle karıştırılmamalıdır. Zira ‘Eksiltmeli’ ve ‘Eklemeli’ transformatör şeklindeki isimlendirmeler polarite açısından [13].

Transformatörler için temsili gösterimler her zaman Şekil-2’deki gibi sargıların sarım yönleri görüleceği şekilde yapılmadığından dolayı, çizimi daha kolay bir şekilde yapılabilen ve basit görünümlü olduğu için tercih edilen başka temsili gösterimlerden, transformatörlerin “Eksiltmeli” veya “Eklemeli” olup olmadığı anlaşılamayacaktır. Şekil-2’de verilen transformatörler için çizimi daha kolay bir şekilde yapılabilen ve basit görünümlü alternatif bir temsili gösterim Şekil-3’te verilmektedir.



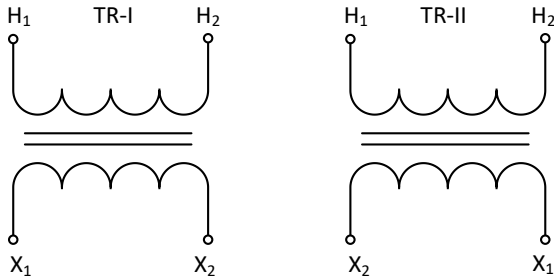
Şekil 2. Primer ve sekonder sarım yönleri gösterilmiş çekirdek tip transformatörler



Şekil 3. Tek fazlı transformatör için temsili gösterimler

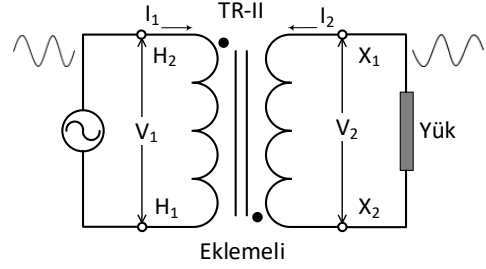
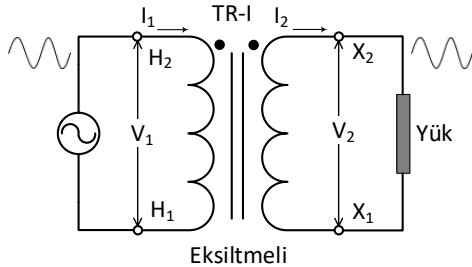
IEEE Std C57.12.00 and IEEE Std C57.12.20™-2005 standardına göre [1], transformatöre üstten dik bir şekilde bakıldığında, sol kolumuzun tarafında kalan primer sargısının ucuna H₁ ve sağ kolumuzun tarafında kalan primer ucuna H₂ isimlendirmesi yapılması şartıyla, sekonderin uçlarından birine X₁ ve diğerine X₂ şeklinde isim verilir. Sekonderin hangi ucuna X₁ ve hangi ucuna X₂ ismi verileceği ise polarite tayini için yapılacak deney sonucuna

bağlıdır. Eğer deney sonucu transformatörün eksiltmeli olduğu belirlenirse, Şekil-3'te sarım yönü belli olmayan temsili gösterimde primer H_1 ucunun karşısındaki sekonder ucuna X_1 ve primer H_2 ucunun karşısındaki sekonder ucuna X_2 ismi verilir. Eğer deney sonucu transformatörün arttırmalı veya eklemeli olduğu belirlenirse, bu defa Şekil-3'te sarım yönü belli olmayan temsili gösterimde primer H_1 ucunun karşısındaki sekonder ucuna X_2 ve primer H_2 ucunun karşısındaki sekonder ucuna X_1 ismi verilir. Örneğin Şekil-2'de gösterilen I ve II nolu transformatörlerin alternatif gösterimi sırasıyla Şekil-3'teki I ve II nolu transformatörler ise, bu transformatörlerden I nolu olan eksiltmeli ve II nolu olan arttırmalı veya eklemeli olduğu için, sekonder uçlarına Şekil-4'teki gibi isimler vermek gerekir.



Şekil 4. Eksiltmeli ve eklemeli transformatörlerin primer ve sekonder sargı uçlarının isimlendirilmesi

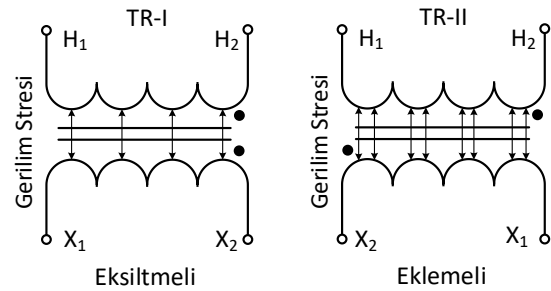
Transformatörlerin aynı zamanda nokta notasyonu yapılarak temsili devre diyagramları çizilebilmektedir. Şekil-5'te, daha önce verilen şekillerde gösterilen I ve II nolu transformatörlere ilişkin nokta notasyonu yapılarak bu transformatörlerin devre diyagramları verilmiştir.



Şekil 5. Nokta notasyonu ile polaritesi anlaşılan transformatör temsili devre diyagramları

3. Gerilim Stresi

Uzun yıllar önce transformatörler güç sistemlerinde yaygın bir şekilde kullanılmaya başlandıktan sonra, iki sargılı transformatörde primer ve sekonder sargılarının arasındaki potansiyel farktan kaynaklı iki sargı arasında bir gerilim stresi meydana geldiği belirlenmiştir [10]. Bu gerilim stresinin transformatörün polaritesinden ve transformatör sargılarından geçen akımların yönünden etkilendiği görülmüştür. Bir transformatörün gerilim stresi arttığında, transformatör ömrünün azaldığı belirlenmiştir. Sargı izolasyon yetmezlikleri artan gerilim stresinin ana sonuçlarından birisidir. Ayrıca eksiltmeli transformatörün eklemeli transformatöre nazaran daha düşük seviyede gerilim stresi meydana getirdiği belirlenmiştir. Şekil-6'da gerilim stresi altında bir transformatör verilmektedir. Örneğin 20.000 volt primer ve 10.000 volt sekonder gerilimine sahip iki sargılı bir transformatör ele alındığında, eksiltmeli ve eklemeli transformatörler açısından gerilim stresi karşılaştırması yapılacak olursa; eksiltmeli transformatör için gerilim stresi, $20.000/2 - 10.000/2 = 5.000$ volt iken eklemeli transformatör için gerilim stresi, $20.000/2 + 10.000/2 = 15.000$ volt kadardır.



Şekil 6. Gerilim stresi altında iki sargılı transformatörler

Görüldüğü gibi polarite açısından eklemeli transformatörde meydana gelen gerilim stresi eksiltmeli transformatörde meydana gelen gerilim stresine göre çok daha büyüktür. Bu nedenle eklemeli olarak üretilecek bir transformatörün gerilim stresi belli bir değerden büyük olacaksa, gerilim stresinin sargı izolasyonuna etkisini azaltmak için o transformatör eksiltmeli transformatör olarak üretilmesi gerekir. Böyle olunca yüksek gerilimli transformatörler daha uzun ömürlü olacaktır. Gerilim stresi hakkında bu kadar bilgi, neden bütün transformatörlerin eksiltmeli transformatörler olarak üretilmediği sorusunu akla getirmektedir.

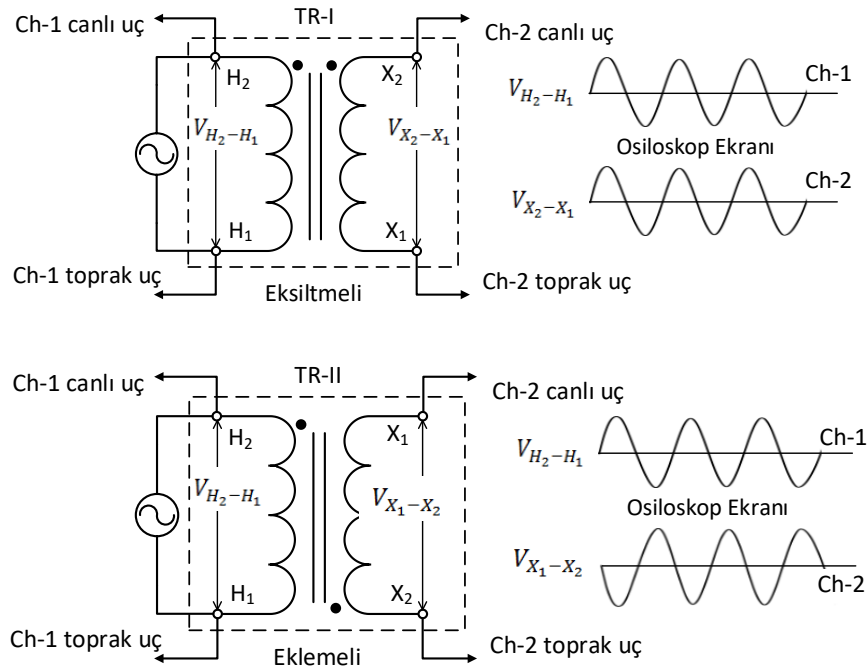
4. Polarite Tayini

Transformatörlerde polaritenin belirlenmesi için;

- Osiloskop kullanılarak polarite belirleme,
- Doğru akım (DC) kullanılarak endüktif darbe ile polarite belirleme,

- Alternatif akım (AC) ile polarite belirleme yollarından biri tercih edilebilir.

Osiloskop kullanılarak polarite tayin edilecekse, transformatörün primer yanına gerilim uygulanarak ve osiloskop'un bağlantıları uygun şekilde yapılarak, osiloskop ekranında iki kanala ait görüntülenecek olan iki sinyalin aralarındaki faz açısına bakmak gerekir. Görüntülenen iki gerilim sinyali aynı fazda ise, transformatörün eksiltmeli yani subtractive bir transformatör olduğuna, görüntülenen iki gerilim sinyali 180° faz farklı ise, transformatörün eklemeli yani additive bir transformatör olduğuna karar verilir ve buna göre standartlara uygun bir şekilde primer ve sekonder uçları sırasıyla H_1-H_2 ve X_1-X_2 sembolleriyle isimlendirilir. Şekil-7'de osiloskop kullanılarak, TR-I ve TR-II'nin polaritelerinin tayin edildiği görülmektedir [3].



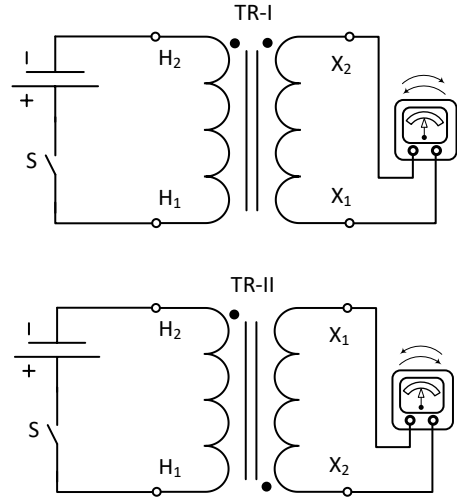
Şekil 7. Osiloskop ile bir transformatörün polaritesinin tayini

DC akım ile polarite tayin edilecekse, 1,5-V veya 6-V'luk bir kuru batarya ve skalası 1,5 ve 10-V olan bir DC voltmetrenin kullanılması gerekir. Voltmetre ibresinin her iki yönde sapma imkânına sahip olabilmesi için, ibrenin aktif

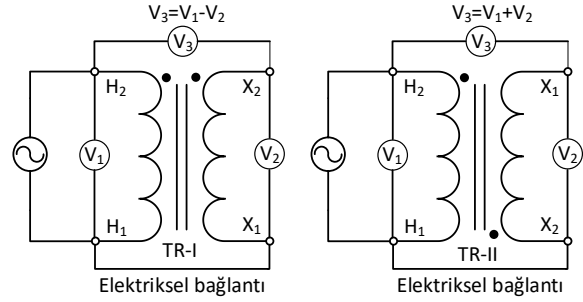
değilken bulunduğu sıfır pozisyonundan skala yönünde mekanik olarak yeterince saptırılarak sıfır pozisyonu değiştirilmesi gerekir. Şekil-8'de verildiği gibi, DC voltmetre sekonder yana ve kuru batarya ise bir anahtar üzerinden primer yana

bağlanmışır. Şekil-8’de görüldüğü gibi, kuru tip DC bataryanın pozitif kutbu primer tarafın H_1 ucuna ve negatif ucu ise primer tarafın H_2 ucuna doğru bağlandığına dikkat ediniz. Anahtar kapatıldığı anda eğer voltmetrenin ibresi endüktif darbe etkisiyle skala yönünde ve anahtar açıldığı anda voltmetrenin ibresi skalanın tersi yönünde saparsa, transformatörün eksiltmeli transformatör polaritesine sahip olduğuna karar verilir. Benzer şekilde, anahtar kapatıldığı anda eğer voltmetrenin ibresi endüktif darbe etkisiyle skalanın tersi yönünde ve anahtar açıldığı anda voltmetrenin ibresi skala yönünde saptığı görülürse, transformatörün eklemeli transformatör polaritesine sahip olduğuna karar verilir. Anahtar açıldığında meydana gelen endüktif darbe, anahtar kapandığında meydana gelen endüktif darbeden çok daha büyük olacağı ve özellikle akım transformatörleri için bu yöntemin transformatör nüvesinde artık bir manyetik alana neden olma ihtimali bulunduğu için, transformatörün bir dahaki çalışmasında doyma girmesine sebep olabileceği bilinmelidir. Bu nedenle, bu testin ardından akım transformatörü üzerinde bir ikaz veya doyma testinin de yapılmasında yarar vardır.

Polarite belirlemenin yollarından bir diğeri ise AC gerilim ile polarite belirlemedir. Burada polaritenin belirlenebilmesi için, transformatörün primer yanı ile sekonder yanı arasında elektriksel bir bağlantı kurmak gerekir. Bu nedenle, Şekil-9’da verildiği gibi primer yan ile sekonder yan arasında elektriksel bağlantı kurulduktan sonra, voltmetreler aracılığıyla ölçülen primer ile sekonder gerilimlerinin, primer yan ile sekonder yan arasında bağlanan üçüncü bir voltmetre tarafından farkı mı yoksa toplamı mı ölçüldüğüne bakmak gerekir. Eğer üçüncü voltmere bu gerilimlerin farkını yansıtıyorsa transformatör eksiltmeli, toplamını yansıtıyorsa transformatör eklemeli transformatör olduğuna karar verilir ve buna göre sekonder uçları, transformatöre üstten dik şekilde bakıldığında sol kolun tarafında kalan primer ucuna H_1 ve sağ kolun tarafında kalan primer ucuna H_2 isimlendirmesi yapılması şartıyla, X_1 - X_2 şeklinde isimlendirilir [3, 4, 8].



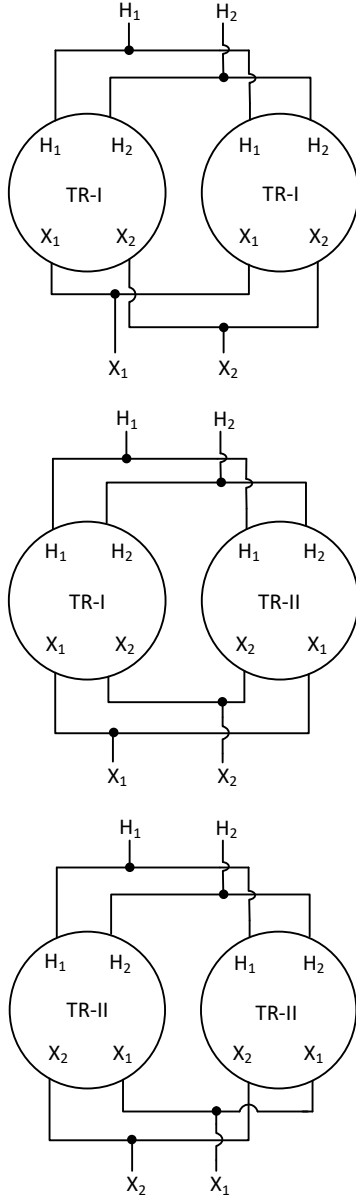
Şekil 8. Endüktif darbe ile polarite belirleme



Şekil 9. AC akım ile polarite belirlemek için bağlantılar

5. Uygulamalar

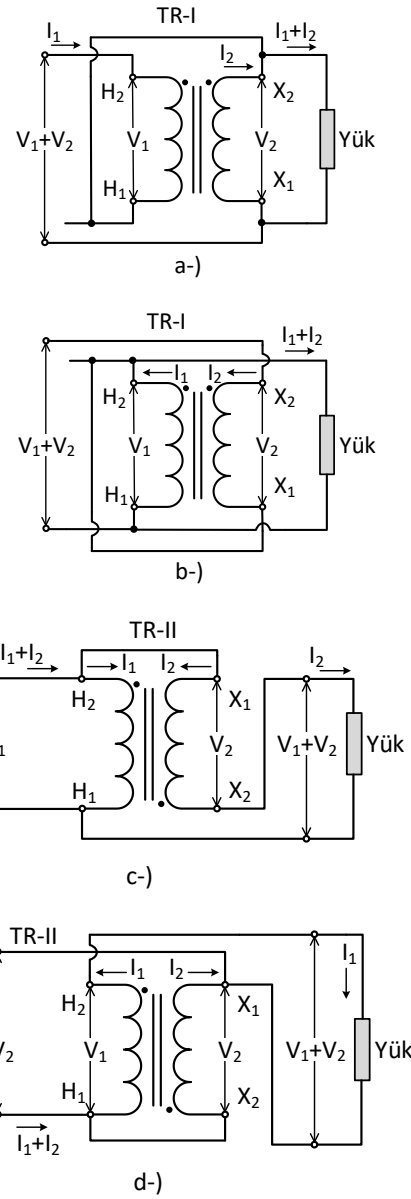
Artık polaritesi belirlenen transformatörler daha yüksek güç kapasitesi oluşturmak için frekans, gerilim ve sarım oranı bakımından aynı, güç bakımından yaklaşık aynı veya aynı anma değerlere sahiplerse ve bağlantı esnasında her iki transformatör arasında empedans uyumu belli sınırlar içerisinde olması kaydıyla, bu defa polarite de dikkat alınarak paralel bağlanabilirler. Bunlar” dikkate alınmadan yapılacak bağlantıda transformatörler büyük oranda zarar görebilir veya kullanılamaz hale gelebilir. Şekil-10’da polarite dikkate alınarak, aynı anma değerlere sahip tek-fazlı transformatörlerin paralel bağlantıları gösterilmiştir.



Şekil 10. Transformatörlerin paralel bağlanması

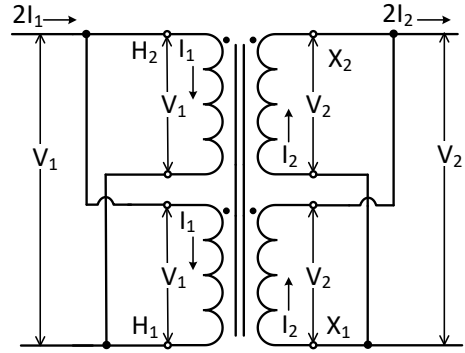
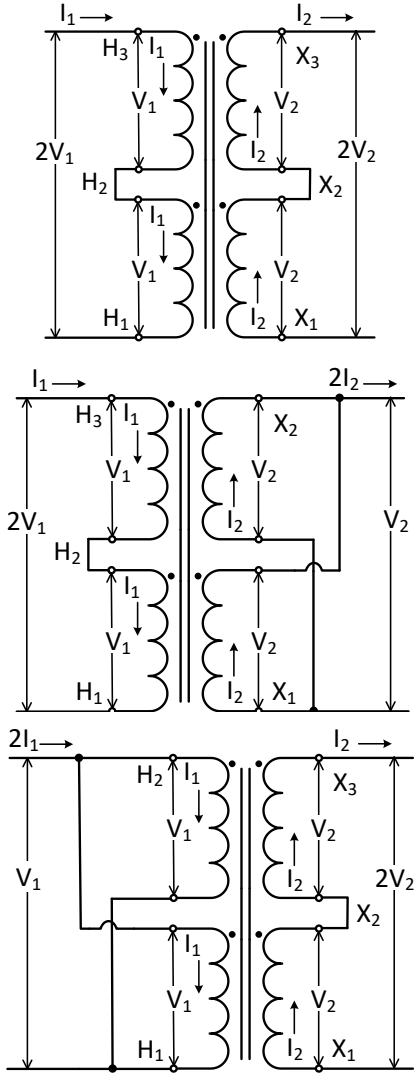
Tek-fazlı bir transformatör oto transformatör olarak da kullanılabilir [7]. Şekil-11'de eksiltmeli ve eklemeli transformatörler kullanılarak, polariteye bağlı bir şekilde değişik dört bağlantı şekli gösterilmiştir. Tek fazlı transformatörün sarım oranına (N_1/N_2) n ve anma gücüne S_N ($V_1 I_1 \cong V_2 I_2$) denilecek olursa, her bir bağlantı sonucunda meydana gelen oto transformatörün hem sarım sayısı hem de beslendiği kaynaktan sekonderine bağlanan yüke aktardığı anma gücü, bu sarım oranı ve anma gücü terimleri cinsinden ifade edilebilir. Şekil-11 a-)’da gösterilen oto transformatörün sarım oranı $n_o = 1 + n$ ve gücü

$S_o = S_N \cdot (1 + 1/n)$ iken, Şekil-11 b-)’de verilen oto transformatörün sarım oranı $n_o = 1 + 1/n$ ve gücü $S_o = S_N \cdot (1 + n)$ kadar olmaktadır. Şekil-11 c-)’de verilen oto transformatörün sarım oranı ise $n_o = 1/(1 + 1/n)$ ve gücü $S_o = S_N \cdot (1 + n)$ iken, Şekil-11 d-)’de gösterilen oto transformatörün sarım oranı $n_o = 1 + n$ ve gücü $S_o = S_N \cdot (1 + 1/n)$ kadar olmaktadır. Anlaşıldığı üzere, Şekil-11 a-) ve d-)’deki bağlantılar için n artacak olursa, oto transformatörün sarım oranı da artmakta ve güç ise anma gücüne doğru azalmaktadır.



Şekil 11. Tek fazlı transformatörlerin oto transformatör olarak kullanılması

Ancak, Şekil-11 b-) ve c-)’deki bağlantılar için n artacak olursa, oto transformatörün sarım oranı birim olmaya doğru azalırken güç artmaktadır. Bu türden bağlantılara sahip oto transformatörler, iki farklı gerilim seviyesine sahip güç iletim hattı arasında bağlantı sağlamak üzere kullanılabilir. Bilindiği üzere motorlara yol vermede de variac denilen oto transformatörlerin rolü bulunmaktadır.



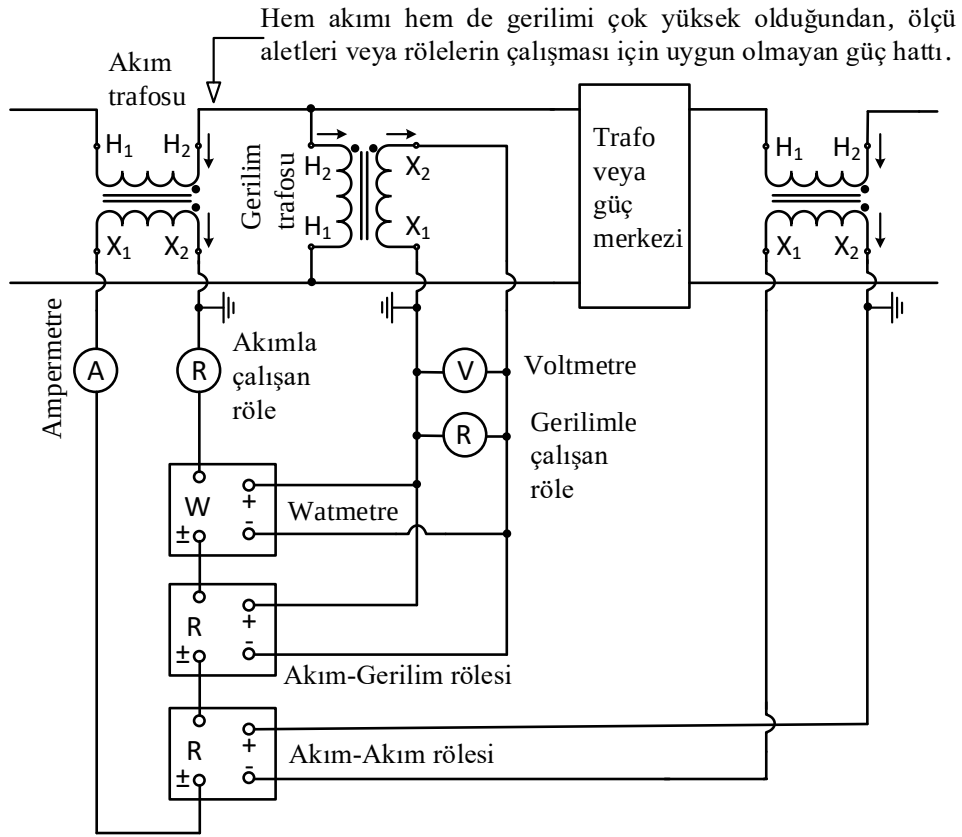
Şekil 12. Dual-transformör sargılarının seri ve paralel bağlantıları

Bazen sekonder yandan, farklı anma gerilim ve akıma ihtiyaç duyan birden fazla sayıda yükü beslemek için, transformatörler gerek primer gerekse de sekonder açısından çoklu sargılara sahip olacak şekilde üretilirler. Bu çoklu sargılar aynı nüve etrafında sarıldıkları için aynı manyetik alana maruz kalarak, sarım sayılarına bağlı bir şekilde üzerlerinde, endüksiyon yasası gereği gerilimler üretilmektedir. Çoklu sargılara sahip transformatör olarak sayılan ve hem primer yanda bulunan iki sargı parçasının hem de sekonder yanda bulunan iki sargı parçasının aralarında, polarite dikkate alınarak seri ya da paralel bir şekilde bağlanabildiği ve dual-transformör şeklinde adlandırılan transformatörler de mevcuttur. Şekil-12’de, polarite dikkate alınarak dual-transformör için örnek seri ve paralel bağlantılar verilmiştir [3].

Ölçü transformatörleri olarak adlandırılan transformatörler ise, güç iletim veya dağıtım sistemlerinde bulunan yüksek gerilim veya akımları uygun seviyelere düşürerek ölçüm cihazları için uygun hale getirmektedir [11, 12]. Bunlar yüksek oranda doğru ölçüm yapabilmeleri için hassas bir şekilde tasarlanan transformatörlerdir. Gerilim ölçmek için kullanılan gerilim transformatöründe, primer yanın sarım sayısı sekonderdeki sarım sayısına göre çok yüksek ve sekonder mutlaka açık devre tutulmalıdır. Akım ölçmek için kullanılan akım transformatöründe ise, primer bir veya iki sarımdan oluşurken sekonder sarım sayısı çok yüksek ve sekonder mutlaka burden denilen yük üzerinden kısa devre tutulmalıdır. Aynı zamanda bu ölçü transformatörlerinin sekonder yanları koruma amaçlı her zaman topraklanmalıdır. Şekil-13’te akım ve gerilim transformatörlerinin

yer aldığı koruma amaçlı bir ölçüm sistemi verilmiştir. Burada akım transformatörü, polarite dikkate alınarak hat ile seri bir şekilde bağlandığı ve hat akımı seviyesinin ampermetre, wattmetre ve röleler için uygun hale getirildiği görülmektedir. Gerilim transformatörü ise, polarite yine dikkate alınarak hat ile paralel bir şekilde bağlandığı ve hat gerilim seviyesinin volmetre, wattmetre ve röleler için uygun hale

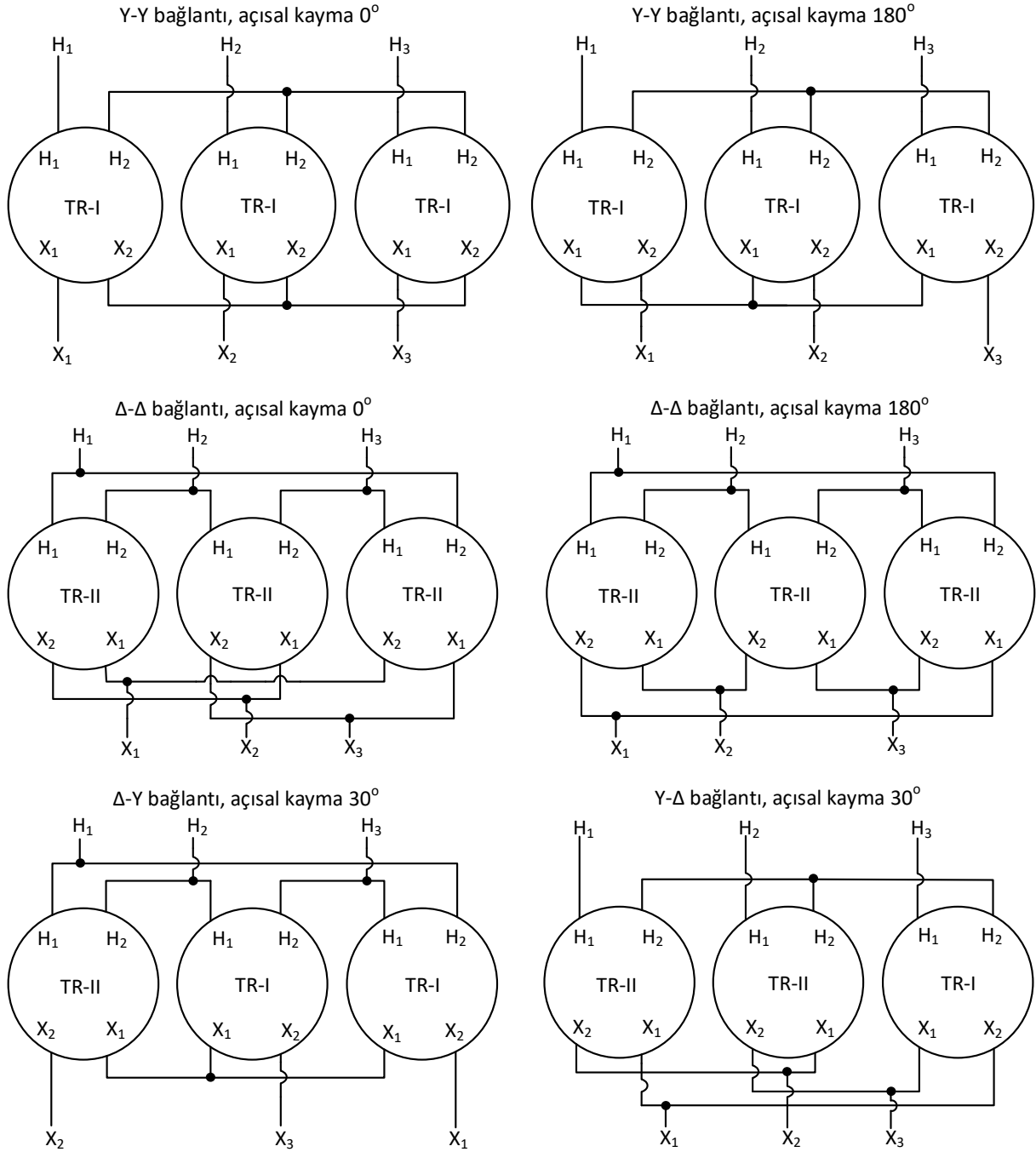
getirildiği görülmektedir. Aynı zamanda, gerilim ve akım değerlerini güvenli seviyede tutmak amacıyla ölçü transformatörlerinin sekonderleri topraklanmıştır. Burada transformatörlerdeki polaritenin yönü akım veya gerilim ölçen ve akımla veya gerilimle çalışan cihazlar için her ne kadar önemli değilse de, akım-akım, gerilim-gerilim veya akım-gerilimle çalışan cihazlar için son derece önemlidir [5, 6, 8].



Şekil 13. Polarite dikkate alınarak ölçü transformatörleri bağlantıları

Son olarak polaritenin önemi açısından, bir üç-fazlı transformatör meydana getirmek için tek-fazlı üç adet transformatör grubunun bağlantısı üzerinde durulacaktır. Burada üç-fazlı transformatör oluşturmak için her zaman üç adet tek-fazlı transformatör grubunun kullanıldığı akla gelmemelidir. Bilindiği üzere üç faz gücü oluştururken, primer ve sekonder Y veya Δ bağlanabileceğinden, üç-fazlı transformatör için

Y-Y, Y- Δ , Δ -Y ve Δ - Δ şeklinde dört adet bağlantı kombinasyonu mevcuttur. Her bir bağlantı kombinasyonunu oluşturmak için alternatif birçok alt kombinasyonlar da bulunmaktadır. Şekil-14'te, üç faz gücü oluşturmak için bir araya getirilen üç adet tek-fazlı transformatör grubunun bağlantılarından yalnız birkaç tanesi verilmektedir [1, 2, 9].



Şekil 14. 3-Faz gücü oluşturmak için polarite dikkate alınarak bağlanmış tek-fazlı transformatörler

6. Sonuç

Transformatörde polaritenin nedeni primer sargısına göre sekonder sargısının sarım yönünden kaynaklıdır. Sarım yönü her zaman bilinemeyeceğinden, sargı uçlarının belli bir standarda göre isimlendirilmesi ve bu sargı ucu belirleme standardının öğrenilmesi gerekir.

Eksiltmeli ve/veya Eklemeli olarak isimlendirilen transformatörlerin sargılarında meydana gelen ve izolasyon yetmezliklerine neden olan gerilim stresinin seviyesi aynı zamanda polariteye bağlıdır. Tek fazlı transformatörlerle 3-faz gücü oluştururken transformatörlerin gerilim ve güç seviyesi bakımından yükün ihtiyacını karşılayabilmek için seri veya paralel

bağlantılarında ve ölçü transformatörlerinin ölçüm cihazları ve koruma röleleriyle olan bağlantılarında, polaritenin bilinmesi ve dikkate alınması esastır. Konuyla ilgili araştırmacılar ve sahada çalışan mühendisler tarafından deneysel yollarla polarite tayini için kullanılan yöntemlerin bilinmesi ve gerektiğinde uygulanması çok önemlidir. Polarite aynı zamanda transformatörün nasıl çalıştığı ve nasıl kullanılacağına anlaşılmada temel rol oynamaktadır.

7. Kaynaklar

1. IEEE Power & Energy Society, (2000). IEEE Standard for Standard Terminal Markings and Connections for Distribution and Power Transformers. *IEEE Std C57.12.70*.
2. Larry Lawhead, Randy Hamilton, John Horak (2006). Three Phase Transformer Winding Configurations and Differential Relay Compensation. *Basler Electric Company, 60th Annual Georgia Tech Protective Relay Conference*.
3. Festo Didactic Ltée/Ltd. (2011). Electricity and New Energy, Single-Phase Power Transformers. www.festo-didactic.com, Quebec, Canada.
4. The McGraw-Hill Companies, Inc. (2010). Transformer Connections and Systems.
5. Kilowatt Classroom, LLC. (2003). Current Transformers; Ratio / Polarity / Types.
6. ABB Inc. Instrument Transformers; Technical Information and Application Guide. 3022 NC 43 North Pinetops, NC 27864, www.abb.com.
7. NPTEL online courses. Auto-Transformer., Module-7, Lesson-27, Version-2 EEIIT Kharagpur, <http://nptel.ac.in/>.
8. Chris Werstiuk. (2005). Back to the Basics - Current Transformer Testing. *International Electrical Testing Association Inc.*, Valence USA, Fall-Winter, 2004.
9. U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation, 'Transformers: Basics, Maintenance, and Diagnostics', Technical Service Center Infrastructure Services Division Hydroelectric Research and Technical Services Group, Denver, Colorado, April 2005
10. <https://www.linkedin.com/pulse/transformer-polarity-mike-hennesey>.
11. GE Digital Energy-ITI, 'Instrument Transformer Basic Technical Information and Application', www.GEDigitalEnergy.com, 1907 Calumet Street, Clearwater, Florida, USA.
12. <http://www.gegridsolutions.com/multilin/notes/artsci/art07.pdf>
13. https://www.eiseverywhere.com/file_uploads/a99add5d970c11c3029e638a905df169_SubstationCommissioning1.pdf.

Düşük Karbonlu Çeliğin Korozyon Davranışına Hekzametilen Tetra Amin'in Etkisi

Reşit YILDIZ

Mardin Artuklu Üniversitesi, Sağlık Yüksekokulu, Hemşirelik Bölümü, 47100, Mardin, Türkiye
resityildiz@artuklu.edu.tr

(Geliş/Received: 10.04.2017; Kabul/Accepted: 06.06.2017)

Özet

Bu çalışmada düşük karbonlu çeliğin (DKÇ) asidik ortamındaki korozyon davranışına hekzametilen tetra amin'in (HMTA) inhibitör etkisi araştırılmıştır. Elektrokimyasal teknikler ve kuantum kimyasal hesaplamalar uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre; HMTA'nın inhibisyon etkinliği artan HMTA derişimi ile artış göstermiştir. 10 mM HMTA içeren 0,1 M HCl çözeltisinde inhibisyon etkinliği %93,6 olarak tespit edilmiştir. Yüksek inhibisyon etkinliği, teorik olarak belirlenen yüksek HOMO (en yüksek enerjili dolu moleküler orbital enerjisi) enerjisi (-6,203 eV) ve düşük LUMO (en düşük enerjili boş moleküler orbital enerjisi) enerjisi (-0,346 eV) ile ilişkilendirilmiştir. HMTA'nın yumuşak çelik yüzeyine adsorpsiyonunun Langmuir adsorpsiyon izotermine uyduğu tespit edilmiştir. HTMA'nın inhibisyon etkinliği, inhibitör moleküllerinin metal yüzeyine adsorplanarak koruyucu bir film oluşturmaları ile açıklanabilir.

Anahtar kelimeler: Korozyon, Düşük karbon çelik, SEM.

The Effect of Hexamethylene Tetramin on the Corrosion Behavior of Low Carbon Steel

Abstract

In this study, the inhibition effect of hexamethylene tetramin (HMTA) on low carbon steel corrosion behavior in acidic environment is investigated. The electrochemical techniques and quantum chemical calculations were obtained. The results showed that; inhibition efficiencies increase with increasing concentration of HMTA. The inhibition efficiency is 93,6% in 10 mM HMTA containing 0,1 M HCl solution. The high inhibition efficiency of HMTA is attributed to the high value of E_{HOMO} (-6.203 eV) and low value of E_{LUMO} (-0.346 eV). The adsorption of HMTA on mild steel was found to fit to Langmuir adsorption isotherm. The inhibition efficiency of HMTA was discussed in terms of adsorption of inhibitor molecules on the metal surface and a protective film formation.

Keywords: Corrosion, Low Carbon steel, SEM

1. Giriş

Metallerin neredeyse tamamı doğada bileşik halinde bulunurlar. Bu bileşiklerden ilave malzeme, emek, enerji ve bilgi kullanmak suretiyle metal veya alaşım oluştururlar. Metal ve alaşımların ise tekrar kararlı durumları olan bileşik haline dönme eğilimleri yüksektir. Bu sebeple, metaller içinde bulundukları ortamın yapıları ile reaksiyona girerek önce iyonik hale, sonra da ortamdaki başka elementlerle birleşerek bileşik haline dönüşebilirler. Bu durumda, kimyasal değişime uğrayabilir veya bozunurlar. Sonuçta, metallerin kimyasal, fiziksel, mekanik

ve elektriksel özelliklerinde istenmeyen bazı değişiklikler meydana gelir ve bu değişiklikler bazı zararlara yol açar [1-3]. İnhibitör özelliği olan maddelerin; inhibisyon etkilerinin ilk basamağının çözelti/metal arayüzeyine adsorpsiyonu olduğu kabul edilir. Adsorpsiyon inhibitörleri genellikle N, S veya O içeren polar fonksiyonel grupları olan konjuge sistemlerdir. Deneysel sonuçlar organik molekülün yapısında bulunan fonksiyonel grupların, inhibitör etkinliğini arttırdığını göstermektedir. Organik molekülde; -OH⁻, -CHO, -COOH, -CN⁻, -SN, CO, -NH₃, SO₃ gibi gruplar, ya da çift bağ üçlü bağ, ortaklanmamış elektronlar varsa, madde ile

metalini kolayca etkileyeceği sıfır yük potansiyelini değiştirerek etkinliği arttırdıkları bilinmektedir. Organik moleküllerde bulunan fonksiyonel grupların etkisi, elektron yoğunluğunun bu gruplar üzerinde daha büyük olmasından kaynaklanmaktadır [4-6].

Literatürde piridin ve türevi bileşikler korozyona karşı inhibitör olarak sıkça kullanılmaktadır [1-8]. Bu bileşiklerin en büyük avantajı ise yapılarındaki konjuge çift bağlar ve düzlemsel yapıdaki hetero siklik halkada bulunan N atomudur. Bu sayede metal yüzeyine adsorpsiyon daha kolay gerçekleşebilir.

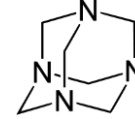
Bu çalışmada, inhibitör madde olarak sıkça kullanılan tetra amin'in (HMTA) düşük karbon çeliğin (DKÇ) korozyon davranışına etkisi araştırılmıştır. DKÇ'nin HMTA içermeyen ve içeren 0,1 M HCl çözeltilerindeki açık devre potansiyellerinin zamanla değişimi takip edilmiştir. Ayrıca farklı daldırma sürelerinde elektrokimyasal impedans spektroskopisi ve polarizasyon ölçümleri gerçekleştirilmiştir. HMTA'nın DKÇ yüzeyindeki adsorpsiyonu deneysel ve kuantum teorik yöntemlerle incelenmiştir.

2. Materyal ve Metot

Deneysel çalışmalarda kullanılan düşük karbon çeliğin (DKÇ) kimyasal bileşimi; (%); 0,17 C, 1,40 Mn, 0,045 P, 0,045 S, 0,009 N ve 98,376 Fe'dir. Yüzey alanı 0,5 cm² dir. Çalışma elektrotlarının hazırlanması için silindirik şeklindeki yumuşak çelik çubuktan 5'er cm boyutunda parçalar kesilmiştir. Kesilen parçaların alt yüzeylerinden bir tanesine delik açılarak bu deliğe bakır tel yerleştirilmiştir. Parçaların delik olmayan ucu açıkta kalacak şekilde polyester ile kaplanmıştır, elektrotların yüzeyi mekanik parlaticıda uygun zımpara kağıtlarıyla (100-1200 grid) parlatıldıktan sonra 1:1 etil alkol: aseton karışımı ile temizlenmiştir. Elektrokimyasal ölçümler üç elektrot tekniğinden yararlanılarak, CHI 660 C model elektrokimyasal analiz cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Sistemde DKÇ çalışma elektrotu, platin (Pt) karşı elektrot ve gümüş-gümüş klorür elektrot (Ag/AgCl, 3M KCl) referans elektrot olarak kullanılmıştır. Farklı derişimlerde (0;0.5;1;5 ve 10 mM) hekzametilen

tetra amin (HMTA) içeren 0,1 M HCl çözeltilerine tespit edilmiştir. DKÇ elektrotlara farklı daldırma sürelerinde sabit E_{ocp} değerlerinde 100 kHz-0.009 Hz frekans aralığında, 7 mV genlik uygulanarak ve elektrolit karıştırılmadan elektrokimyasal impedans spektroskopisi ölçümleri elde edilmiştir. Kuantum teorik hesaplamalar GaussView 4.1 ve Gaussian 03W programları ile gerçekleştirilmiştir. DFT yaklaşımıyla, 6-311++G (d,p) baz seti kullanılmıştır. Belirlenen değişkenler; E_{HOMO} (en yüksek enerjili dolu moleküler orbital enerjisi), E_{LUMO} (en düşük enerjili boş moleküler orbital enerjisi), ΔE (E_{LUMO} - E_{HOMO}), μ (dipol moment), mutlak elektronegatiflik (χ), mutlak sertlik (η) vb.'dir.

Hekzametilen tetra amin'in (HMTA) yapısı Şekil 1'de verilmiştir.

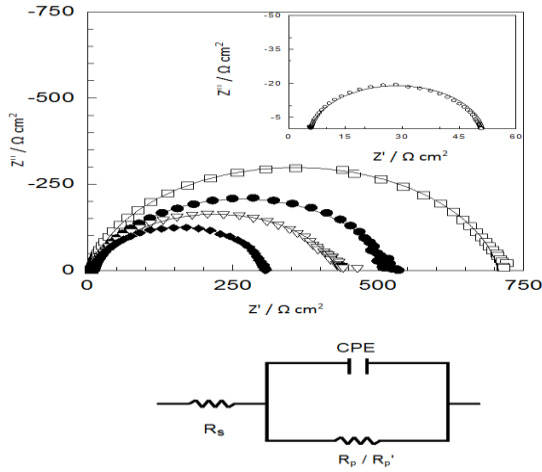


Şekil 1. Hekzametilen tetra amin (HMTA)

3. Sonuçlar

3.1. Elektrokimyasal impedans spektroskopisi

DKÇ'in HMTA içermeyen ve farklı derişimlerde HMTA içeren 0,1 M HCl'de 1 saat bekleme süresi sonunda elde edilen elektrokimyasal impedans spektrumları Şekil 2'de sunulmaktadır. Şekil 2'de görüldüğü gibi yüksek frekans bölgesinde başlayarak, orta frekans bölgesinde devam eden ve düşük frekans bölgesinde kapanan yarı eliptik eğriler tespit edilmiştir. Özellikle HMTA içermeyen ortamda elde edilen eğri oldukça düşük faz açısına sahip ve basık eliptik bir eğridir.



Şekil 2. DKÇ elektrotların HMTA içermeyen (o) (büyütülerek verilmiştir) ve farklı derişimlerde 0,5 (♦), 1,0 (∇), 5,0 (●) ve 10 (□) mM HMTA içeren 0,5 M HCl çözeltisinde 1 saat bekleme süresi sonunda elde edilen Nyquist eğrileri (- fit çizgisi) ve eşdeğer devre modeli

Nyquist eğrilerinden 0.0;1;0.5;1;5 ve 10 mM heksametilen tetra amin (HMTA) içeren 0.1 M HCl çözeltisinde belirlenen direnç değerleri sırasıyla, 45; 295; 423; 509 ve 702 ohm'dur (Şekil 2).

Metal-asit çözeltisi ara yüzeyinde oluşan elektriksel eşdeğer devre Şekil 2 de gösterilmiştir. Burada R_s çözelti direncini, R_p polarizasyon direnci ($R_p' = R_p (R_{ct} + R_d + R_a + R_f)$), R_a birikinti direnci, R_f film direncini, R_d difüz tabaka direnci, R_{ct} yük transfer direncini ve n değeri ise faz kaymasını göstermektedir. Burada uygun bir fit yapabilmek için CPE sabit faz elementi kullanılmıştır [9].

Eğriler Şekil 2'de verilen eşdeğer devreye uygun olarak modellenmiştir ve belirlenen eşdeğer devre elemanları Tablo 1'de sunulmaktadır. R_s çözelti direncini, CPE ise sabit faz elementini temsil etmektedir. Eğrilerin basık eliptik şekli sebebiyle modelleme CPE'ye uygun olarak yapılmıştır. $\eta\%$ değeri inhibisyon etkinliği olup eşitlik (2) yardımıyla hesaplanmıştır.

Tablo 1. Elektrokimyasal impedans ölçümlerinden elde edilen veriler

Cinh (mM)	EIS			
	$R_p(\Omega \text{ cm}^2)$	$CPE(\mu F \text{ cm}^2)$	n	$\eta(\%)$
0,0	45	460	0,90	
0,5	295	156	0,90	84,7
1,0	423	136	0,91	89,3
5,0	509	126	0,88	91,1
10	702	108	0,90	93,6

$$Z_{CPE} = \frac{1}{Y_0(j\omega)^n} \quad (1)$$

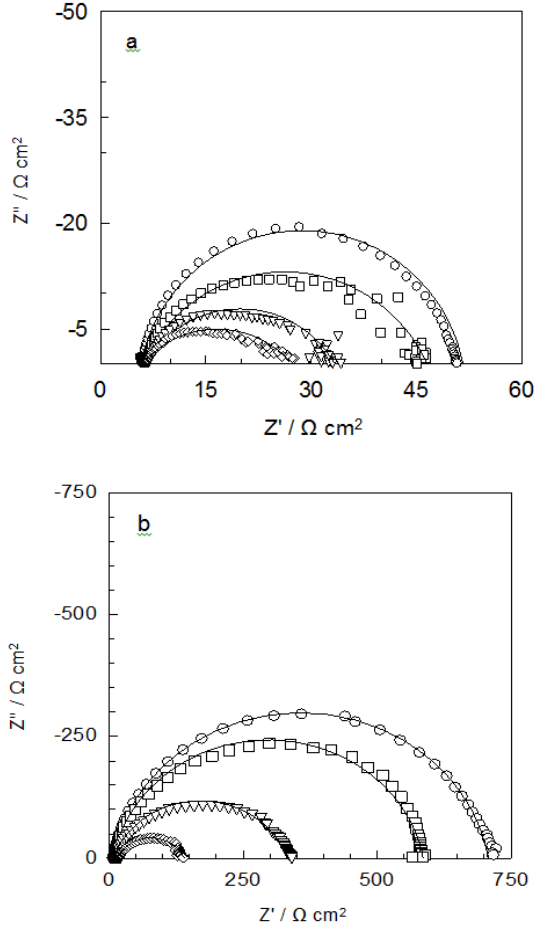
$$\eta\% = \left(\frac{R_p' - R_p}{R_p'} \right) \times 100 \quad (2)$$

Eşitliklerde (1)-(2), Y_0 ve n , frekanstan bağımsız parametreler olup, $-1 \leq n \leq 1$ dir. ω impedansın imajinal bölümünün açısal frekansıdır. R_p and R_p' sırasıyla inhibitörsüz ve inhibitörlü ortamdaki direnç değerleridir.

Tablo 1'de görüldüğü 1 saat bekleme süresinin sonunda elde edilen elektrokimyasal impedans spektroskopisi ölçüm sonuçlarına göre; artan HMTA derişimi ile direnç değerleri artmış ve CPE değerleri azalmıştır. En yüksek inhibisyon etkinliği 10 mM HMTA içeren ortamda %93,6 olarak belirlenmiştir.

3.2. Zamanla değişen inhibitör etkinliği

Şekil 3'de DKÇ elektrotun 0,1 M HCl (a) ve 10 mM HMTA içeren 0,1 M HCl (b) çözeltisinde farklı bekleme sürelerinde (1, 24, 72 ve 120 saat) elde edilen Nyquist eğrileri görülmektedir. Şekil 3'de her iki Nyquist eğrisinde de yüksek frekans bölgesinde başlayarak orta frekans bölgesinde devam eden ve düşük frekans bölgesinde kapanan yarı eliptik eğri görülmektedir. Eğriler Şekil 2'de yer alan eşdeğer devreye göre modellenmiştir.



Şekil 3. DKÇ elektrotların HMTA içermeyen (a) 10 mM HMTA içeren (b) 0,1 M HCl çözeltilerinde farklı daldırma sürelerinde 1h (○), 24 h (□), 72 h (Δ) ve 120 h (◇) elde edilen Nyquist eğrileri (-fit çizgisi)

Şekil 3’de görüldüğü gibi artan bekleme süresi ile HMTA içermeyen ve içeren ortamlarda direnç değerleri azalmıştır. Bu durum koroziv ortamla uzun süre temas eden metalin çözünmesinden ve metal çözelti ara yüzüne iç Helmholtz tabakaya kadar spesifik adsorplanabilen Cl^- iyonlarının aşındırıcı etkisinden kaynaklanabilir [9]. HTMA içeren ortamda DKÇ’nin direnç değerlerinin (R_p), içermeyen ortama (R_p) kıyasla çok daha yüksek olduğu görülmektedir. Eşitlik 2 yardımıyla belirlenen inhibisyon etkinliğinin zamanla değişimi Tablo 2’de verilmiştir.

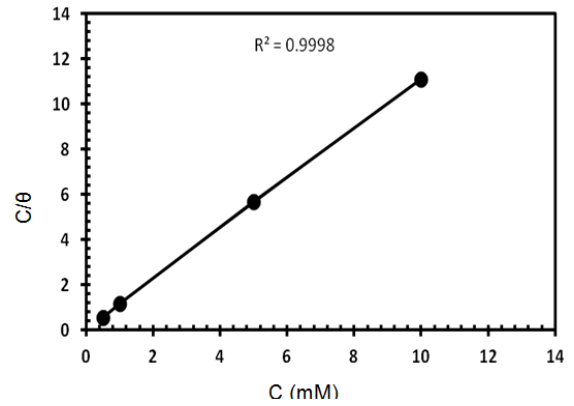
Tablo 2. 1-120 saat daldırma süreleri sonunda elektrokimyasal impedans spektroskopisi ölçümlerinden belirlenen inhibisyon etkinlikleri

t(h)	Çıplak	HMTA	
	EIS	EIS	
	$R_p(\Omega \text{ cm}^2)$	$R_p(\Omega \text{ cm}^2)$	$\eta(\%)$
1	45	702	93,6
24	39	571	93,1
72	25	322	92,2
120	20	122	83,6

3.3. Adsorpsiyon izotermi

Yüzeyin kaplanma kesri, inhibitörün adsorpsiyon karakteristiğinin belirlenmesinde oldukça faydalıdır. Bu tür veriler adsorpsiyon mekanizması hakkında detaylı bilgiler veren, adsorpsiyon izotermelerinin çizilmesinde kullanılabilir. Adsorpsiyon izotermeleri kullanılarak adsorpsiyon ile ilgili parametreler belirlenir. Adsorpsiyonun hangi izotermeye uyduğunun belirlenmesi için inhibitör derişimi (C) ile yüzeyin kaplanma kesri (θ) arasındaki bağıntının bilinmesi gerekmektedir [10].

Tablo 2’de görüldüğü gibi HMTA DKÇ’nin 0,1 M HCl çözeltisinde korozyon davranışına uzun daldırma süreleri boyunca (120 saat) inhibisyon etkisi göstermektedir. HMTA’nın DKÇ yüzeyine adsorpsiyonunun incelenmesi amacıyla adsorpsiyon izotermelerinden yararlanılmış ve en uygun olanın Langmuir adsorpsiyon izotermi olduğu belirlenmiştir (Şekil 4).



Şekil 4. DKÇ’nin farklı derişimlerde HMTA içeren 0,1 M HCl çözeltilerinde elde edilen Langmuir adsorpsiyon izotermi

$$\frac{C_{inh}}{\theta} = \frac{1}{K_{ads}} + C_{inh} \quad (3)$$

Eşitlik 3’de C_{inh} inhibitör derişimini, θ yüzey kaplanma kesrini, K_{ads} ise adsorpsiyon denge sabitini temsil etmektedir [10-13]. Şekil 6’da, Eşitlik 3 yardımıyla belirlenen K_{ads} değeri $16,6 \times 10^3 \text{ M}^{-1}$ dir. Bu değerin büyüklüğü HMTA’nin DKÇ yüzeyine oldukça güçlü adsorplandığını göstermektedir. Eşitlik 4 yardımıyla belirlenen ΔG_{ads}^0 değeri ise yaklaşık $34,04 \text{ kJ mol}^{-1}$ olarak hesaplanmıştır ve bu değer adsorpsiyonun fiziksel olarak gerçekleştiğini göstermektedir [14-20].

$$\Delta G_{ads}^0 = -RT \ln(55.5 K_{ads}) \quad (4)$$

3.4. Sıfır yük potansiyelinin (PZC) belirlenmesi

Fiziksel adsorpsiyon, elektrikli arayüzey ile organik iyon veya dipolün elektrostatik çekim kuvvetlerinin bir sonucudur. Metalin yüzey yükü metal/çözelti ara yüzeyinde oluşan elektrik alandan kaynaklanmaktadır ve açık devre potansiyelinin (E_{ocp}) sıfır yük potansiyeline (E_{pzc}) kıyaslanması ile bulunabilir. Antropov tarafından bağıl korozyon potansiyeli olarak tanımlanan E_r , $E_r = E_{ocp} - E_{pzc}$ şeklinde hesaplanabilir. Eğer E_r negatif ise elektrot yüzeyi negatif yüklüdür ve katyonların adsorpsiyonu tercihtir. Ters durumda yani E_r pozitif ise anyonların adsorpsiyonu söz konusudur.

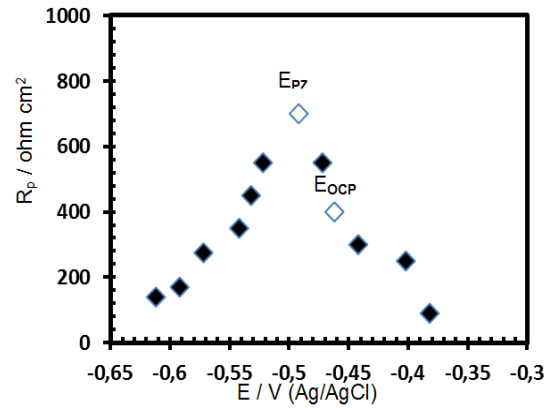
Bir çözelti içinde inhibitörün adsorplanabilirliği metalin sıfır yük potansiyeline bağlıdır. Korozyon koşullarında metallerin farklı yüklerde bulunabilmesi, inhibitörlerin seçici davranışlarında önemli bir etken olmaktadır. Özellikle elektrostatik adsorpsiyonda PZC (potential of zero charge) önemli rol oynamaktadır. Kimyasal adsorpsiyonda ise moleküllerin inhibitif özellikleri yüzeyin yükünden etkilenmemektedir.

$$E_r = E_{ocp} - E_{pzc} \quad (5)$$

E_r : Antropov bağıl korozyon potansiyeli

Şekil 5 de 10 mM içeren 0,1 M HCl çözeltisinde elde edilen R_p -potansiyel eğrisi

görülmektedir. Elde edilen eğrinin maksimum noktası (minimum Cdl değeri, $R_p = 1/2\pi f Cdl$) sıfır yük potansiyeline karşılık gelmektedir. Eğride de açık devre potansiyeli sıfır yük potansiyeline göre daha pozitif değerde kalmaktadır. Bu da yumuşak çeliğin pozitif yüklü olduğunu göstermektedir. HMTA molekülleri ise ortamda moleküler halleri ile dengede protonlanmış halde bulunmaktadır. [19].

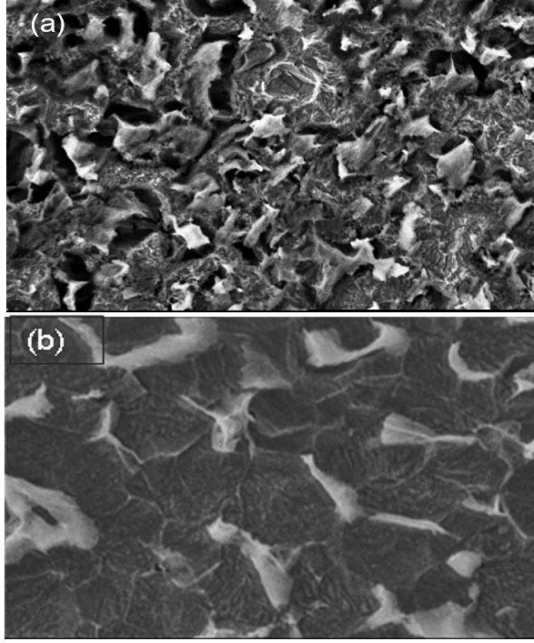


Şekil 5. DKÇ elektrotun 10 mM HMTA içeren çözeltide elde edilen potansiyel-polarizasyon direnci grafiği

Şekil 5 de görüldüğü gibi 0,1 M HCl solution containing 10 mM HMTA elde edilen eğrinin maksimum olduğu nokta -0,492 V (vs. Ag/AgCl) dir. Bu noktaya sıfır yük potansiyelidir. Aynı koşullar altında açık devre potansiyeli ise -0,462 V (vs. Ag/AgCl) dir. ($E_r = +0,030 \text{ V}$ (vs. Ag/AgCl)). Bu sonuç DKÇ elektrotun yüzeyinin çalışılan koşullarda pozitif yüklü olduğunu göstermektedir.

3.5. SEM görüntüleri

0,1 M HCl çözeltisi içerisinde 120 saat sonunda inhibitörsüz ve 10 mM inhibitörlü ortamdaki SEM görüntüleri Şekil 6 da verilmiştir. Şekil 6 a da görüldüğü gibi inhibitörsüz ortamda metal yüzeyinde çok sayıda çukurcuk ve hasarın olduğu gözlenmiştir ancak Şekil 6 b de HMTA inhibitörlü ortamda metalin yüzeyinin daha düz olduğu ve metali koruduğunu göstermektedir.



Şekil 6. DKÇ nin 0,1 M HCl çözeltisi içerisinde 120 saat sonunda inhibitörsüz (a) ve 10 mM HMTA (b) inhibitör ortamında SEM görüntüleri

3.6. Kuantum teorik hesaplamalar

Düşük karbon çelik yüzeyinde adsorpsiyonunun açıklanabilmesi için kuantum teorik hesaplamalar yapılmıştır. Bu amaçla DFT yaklaşımıyla, 6-311++G (d,p) baz seti kullanılmıştır. HMTA molekülünün en düşük enerjili boş orbital (LUMO) enerjisi -0,346 eV; en yüksek enerjili dolu orbital (HOMO) enerjisi -6,203 eV olarak hesaplanmıştır. Bu orbitaller Şekil 7'de görülmektedir. HMTA için belirlenen dipol moment değeri ise 0,0017 D'dir. Ayrıca HMTA'nın ΔE (LUMO-HOMO), mutlak elektronegatiflik (χ), mutlak sertlik (η) değerleri de aşağıdaki formüllere göre belirlenmiştir. [19-20];

$$A = -E_{\text{LUMO}} \quad (6)$$

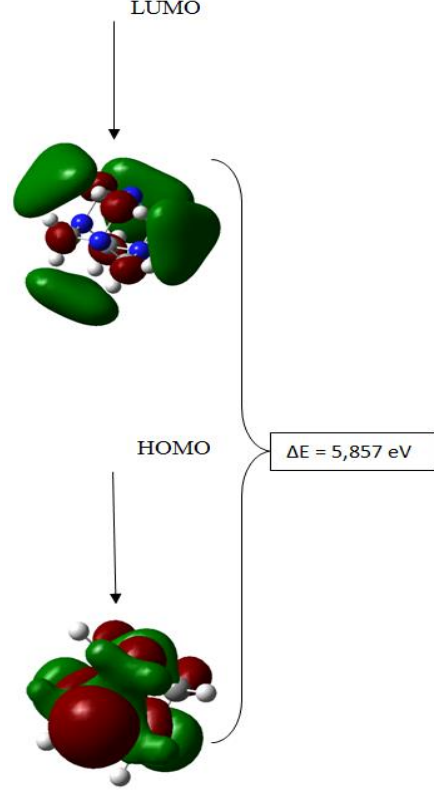
$$I = -E_{\text{HOMO}} \quad (7)$$

$$\chi = \frac{I + A}{2} \quad (8)$$

$$\eta = \frac{I - A}{2} \quad (9)$$

Elde edilen sonuçlara göre; ΔE değeri 5,857 eV iken, mutlak elektronegatiflik (χ) 3,275 ve

mutlak sertlik (η) 2,929 olarak hesaplanmıştır. Buna göre HMTA'nın düşük karbon çelik yüzeyine adsorpsiyonunun kolay bir şekilde gerçekleşebileceği düşünülmektedir.



Şekil 7. HMTA'nın LUMO ve HOMO şekilleri

HMTA moleküllerinin, asidik ortamda pozitif yükle yüklenmiş olan DKÇ yüzeyine, negatif uçlardan yaklaşacağı düşünülmektedir.

Sonuç olarak düşük karbon çeliğin 0,1 M HCl çözeltisi içindeki korozyonuna inhibitör etkisi, yapılan deneyler içerisinde en yüksek konsantrasyon olan 10 mM derişimde HMTA molekülünde inhibitör etkinliği % 93,6 olarak hesaplanmıştır.

Deneyisel verilerden HMTA'nın 0,1 M HCl çözeltisi içinde düşük karbon çeliğin yüzeyine adsorpsiyonunun Langmuir adsorpsiyon izotermine uyduğu tespit edilmiştir.

4. Teşekkür

Bu çalışmaya maddi desteği sağlayan Mardin Artuklu Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimine (MAÜ-BAP-16-SYO-06) teşekkür ederiz.

5. Kaynaklar

1. Karthikaiselvi R. ve Subhashini S., (2014). Study of adsorption properties and inhibition of mild steel corrosion in hydrochloric acid media by water soluble composite poly (vinyl alcohol-o-methoxy aniline). *Journal of the Association of Arab Universities for Basic and Applied Sciences*, **16**, 74-82.
2. Tuken T , Demir F., Kıcı N., Sığırık G., Erbil M., (2012). Inhibition effect of 1-ethyl-3-methylimidazolium dicyanamide against steel corrosion. *Corrosion Science*, **59**, 110–118.
3. R. Solmaz, G. Kardaş, M. Çulha, B. Yazıcı, M. Erbil, (2008). Investigation of adsorption and inhibitive effect of 2-mercaptothiazoline on corrosion of mild steel in hydrochloric acid media. *Electrochim Acta*, **53**, 5941–5952.
4. Kosari A, Moayed MH, Davoodi A, Parvizi R, Momeni M, Eshghi H, Moradi H. (2014). Electrochemical and quantum chemical assessment of two organic compounds from pyridine derivatives as corrosion inhibitors for mild steel in HCl solution under stagnant condition and hydrodynamic flow. *Corrosion Science*, **78**, 138-150.
5. Ansari K, Quraishi MA, Singh A. (2015). Corrosion inhibition of mild steel in hydrochloric acid by some pyridine derivatives: An experimental and quantum chemical study. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, **25**, 89–98.
6. Tebbji K, Ouddac H, Hammouti B, Benkaddour M, Kodadi M, Ramdani A. (2005). Inhibition effect of two organic compounds pyridine–pyrazole type in acidic corrosion of steel. *Colloids and Surfaces A*, **259**, 143–149.
7. Mourya P, Sing P, Rastogi R, Singh M. (2016). Inhibition of mild steel corrosion by 1,4,6-trimethyl-2-oxo-1,2-dihydropyridine-3-carbonitrile and synergistic effect of halide ion in 0.5 M H₂SO₄. *Applied Surface Science*, **380**, 141–150.
8. Bouklah M, Attayibat A, Hammouti B, Ramdani A, Radi S, Benkaddour M. (2005). Pyridine–pyrazole compound as inhibitor for steel in 1 M HCl. *Applied Surface Science*, **240**, 341–348.
9. Bockris JO, Reddy AKN, (2000). Gamboa AM. *Modern electrochemistry Fundamentals of electrodicts*. 2nd ed. New York, USA, Plenum.
10. Scendo M, Trela J. (2013). Adenine as an Effective Corrosion Inhibitor for Stainless Steel in Chloride Solution. *International Journal of Electrochemical Science*, **8**, 9201–9221.
11. Deng S, Li X, Xie X. (2014). Hydroxymethyl urea and 1,3-bis(hydroxymethyl) urea as corrosion inhibitors for steel in HCl solution. *Corrosion Science*, **80**, 276–289.
12. Khamis A, Saleh MM, Awad MI, El-Anadouti BE. (2013). Enhancing the inhibition action of cationic surfactant with sodium halides for mild steel in 0.5 M H₂SO₄. *Corrosion Science*, **74**, 83–91.
13. Li X, Deng S, Fu H, Xie X. (2014). Synergistic inhibition effects of bamboo leaf extract/major components and iodide ion on the corrosion of steel in H₃PO₄ solution. *Corrosion Science*, **78**, 29–42.
14. Yadav M, Sinha RR, Kumar S, Bahadur I, Ebenso EE. (2015). Synthesis and application of new acetohydrazide derivatives as a corrosion inhibition of mild steel in acidic medium: Insight from electrochemical and theoretical studies. *Journal of Molecular Liquids*, **208**, 322–332.
15. Zhanga D, Tanga Y, Qia S, Donga D, Cang H, Lu G. (2016). The inhibition performance of long-chain alkyl-substituted benzimidazole derivatives for corrosion of mild steel in HCl. *Corrosion Science*, **102**, 517-522.
16. Yüce A, Telli E, Doğru Mert B, Kardaş G, Yazıcı B. (2016). Experimental and quantum chemical studies on corrosion inhibition effect of 5,5 diphenyl 2-thiohydantoin on mild steel in HCl solution. *Journal of Molecular Liquids* **218**, 384-392.
17. Yıldız R., Doğan T., Dehri İ., (2014). Evaluation of Corrosion Inhibition of Mild Steel in 0.1 M HCl by 4-Amino-3-Hydroxynaphthalene-1-Sulphonic Acid. *Corrosion Science*, **85**, 215-221.
18. Yıldız R., Döner A., Doğan T., Dehri İ., (2014). Experimental studies of 2-pyridinecarbonitrile as corrosion inhibitör for mild steel in hydrochloric acid solution. *Corrosion Science* **82**, 125–132.
19. Yıldız R. (2015). An electrochemical and theoretical evaluation of 4,6-diamino-2-pyrimidinethiol as a corrosion inhibitor for mild steel in HCl solutions. *Corrosion Science*, **90**, 544-553.
20. Martinez S. (2002). Inhibitory mechanism of mimosa tannin using molecular. *Mater Chem. Physic.* **77**, 97-102.

(La_{0.9}Gd_{0.1})_{0.85}Ag_{0.15}MnO₃ Manyetik Soğutucu Malzemede Kısmi Gd Değişiminin Yapısal, Manyetik ve Manyetik Soğutma Özellikleri Üzerine Etkisi

Ali Osman AYAŞ

Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Adıyaman Üniversitesi, 02040 Adıyaman
e-mail: aayas@adiyaman.edu.tr

(Geliş/Received: 12.04.2017; Kabul/Accepted: 06.07.2017)

Özet

Bu çalışmada La ile Gd yer değiştirmesinin, sol-jel yöntemi ile üretilmiş, (La_{0.9}Gd_{0.1})_{0.85}Ag_{0.15}MnO₃ manyetik soğutucu örneğinde yapısal manyetik ve manyetik soğutucu özellikler üzerine olan etkileri araştırılmıştır. X-ışınları kırınım tekniğiyle çalışılmış olan kristal yapı R3c uzay gruplu rombohedral yapıdadır. Fakat GdMn₂O₅ yapısına ait küçük miktardaki yansımalar da belirlenmiştir. SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu)-EDS (Enerji Kırınımlı x-ışınları kırınımı Spektrumu) sonuçları örneğin kare yapıli taneciklerden oluştuğunu ve beklenen tüm elementleri içerdiğini göstermiştir. Sıcaklığa bağlı manyetizasyon ölçümlerinden, sıcaklığın artırılması ile ferromanyetik fazdan paramanyetik faza doğru gerçekleşen bir manyetik faz geçişi ($T_C = 190$ K) gözlemlenmiştir. İzotermal koşullardaki, uygulanan alana bağlı manyetizasyon ölçümleri faz geçişinin doğasının ikinci dereceden olduğunu göstermiştir. En yüksek Manyetik Entropi Değişim değeri (ΔS_M) 50 kOe dış manyetik alan altında 2.5 J/kgK şeklinde hesaplanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Curie sıcaklığı, Manyetik entropi değişimi, Manyetik soğutma teknolojisi.

Effect of Partial Gd Substitution on Structural, Magnetic and Magnetic Cooling Properties in (La_{0.9}Gd_{0.1})_{0.85}Ag_{0.15}MnO₃ Magnetic Cooling Material

Abstract

In this work, the effect of Gd substitution with La on structural, magnetic and magnetic cooling properties in (La_{0.9}Gd_{0.1})_{0.85}Ag_{0.15}MnO₃ magnetic cooling sample prepared by sol-gel method has been studied. The crystallinity has been worked by x-ray diffraction technique that sample is in rhombohedral structure with R3c space group. But small amount of reflections belonged to GdMn₂O₅ phase are also detected. SEM (Scanning Electron Microscope)-EDS (Energy dispersive x-ray diffraction Spectrum) analysis shows that sample is constituted from square shaped grains and includes all expected elements. A magnetic phase transition ($T_C = 190$ K) from ferromagnetic to paramagnetic phase is observed from temperature dependence of magnetization measurement by increasing temperature. Applied field dependence of magnetization under isothermal process shows that nature of the phase transition is second order. Maximum magnetic entropy change (ΔS_M) value was calculated as 2.50 J/kgK under 50 kOe external magnetic fields.

Keywords: Curie temperature, Magnetic entropy change, Magnetic cooling technology.

1. Giriş

Modern toplum yüksek enerji gerekliliği ve çevresel zararlar şeklindeki iki önemli probleme odaklanmıştır. Bu problemlerin çözümü için, mevcut teknolojilerin enerji verimliliğinin artırılması ve çevre dostu teknolojilerin ortaya çıkmasına gereksinim duymaktayız. Manyetokalorik Etki (MKE) prensibine dayalı Manyetik Soğutma (MS) sistemleri, mevcut

soğutma sistemlerinden daha verimli bir teknoloji olması ve çevre dostu soğutucu malzemeler kullandığı için hem enerji talebi hem de çevre problemi sorununun çözümü adına büyük bir fırsat sunmaktadır [1-3]. Manyetokalorik etki, manyetik alt örgünün uygulanan manyetik alanla etkileşmesinden doğan bir özelliktir. Artış gösteren manyetik alan manyetik momentlerin uygulanan manyetik alanın yönünde yönelmelerine yol açar ve

sistemin manyetik entropisini azaltır. Eğer bu işlem adiabatik koşullarda gerçekleştiyse, sistemin toplam entropi değerini sabit tutacak şekilde elektronik ve örgü entropisi dolayısıyla da sistemin sıcaklığı artar. Eğer uygulanan manyetik alan kaldırılırsa sistem tersi şekilde davranır ve sıcaklığı azalır. Bu şekilde ortamın soğutulması işlemi MS şeklinde adlandırılır.

MS camiası en uygun özelliklere sahip malzemenin elde edilmesi amacıyla manganitler [4-7], La-Fe-Si alaşımları [6], Gd temelli alaşımlar [6], gibi çok geniş bir malzeme ailesi üzerinde çalışmalarını yürütmektedir. Bunlar arasında, ABO₃ şeklinde formüle edilen manganit perovskit malzemeler, ucuz maliyet, kolay üretim yöntemleri, Curie Sıcaklığı (T_C) değerinin katkılama ile ayarlanabilir olması, yüksek kimyasal kararlılık gibi önemli avantajlara sahip olmaları nedeniyle büyük oranda ilgi çekmektedir [8].

Ferromanyetik Çift Değiş-Tokuş (ÇDT), antiferromanyetik Süper Değiş-Tokuş (SDT), spin-fonon çiftlenimi özellikleri, manganit malzemelerdeki manyetokalorik etkiye tesir eden parametrelerden en önemlileridir [9-12]. Bu etkileşimler Uyumsuzluk Etkisi (σ^2) (mismatch effect) [13], oksijen sitokiyometrisi [14], A bölgesi ortalama iyonik yarıçapı (r_A) [15] ve katkı miktarı gibi parametreler ile belirlenebilir.

Son zamanlarda, yukarıda bahsedilen mekanizmaların daha iyi anlaşılması adına, La-bölgesine çeşitli 1⁺ ve 2⁺ yüklü katyonlar ile katkılama çalışmaları yürütülmüştür [7, 8]. Ancak 3⁺ yüklü katyonların katkılama etkilerinin detaylı bir şekilde açıklaması halen yapılmamıştır [8]. Bu nedenle, bu çalışmada La³⁺ ile yer değiştirecek şekilde Gd³⁺ katkılama, (La_{0.9}Gd_{0.1})_{0.85}Ag_{0.15}MnO₃ manganit numunesinin yapısal, manyetik ve manyetokalorik özellikleri üzerine olan etkisi çalışılmıştır.

2. Deneysel Yöntem

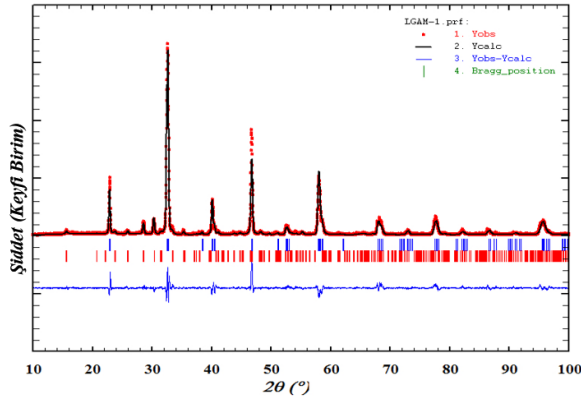
LGAM-1 şeklinde kodlanan polikristal (La_{0.9}Gd_{0.1})_{0.85}Ag_{0.15}MnO₃ örneği yüksek saflıktaki ($\geq 99.99\%$) La₂O₃, Mn(NO₃)₂·4H₂O, Gd(NO₃)₃·6H₂O, AgNO₃ kimyasalların başlangıç elementi olarak kullanılması ve sol-jel yöntemi ile üretilmiştir. Mono-etilen glikol (99.9% saflıkta), sitrik asit mono-hidrat (99.9% saflıkta)

hidroklorik asit (37% saflıkta) ve nitrik asit (70% saflıkta) kimyasalları da şelatlaştırıcı (jelleştirici) olarak kullanılmıştır. Numune üretiminin detayları diğer bir çalışmada belirtilmiştir [17]. Örneğin toz X-Işını Kırınım (XRD) desenleri SIEMENS D5000 difraktometresi ile Cu-K α radyasyonunda oda sıcaklığında ölçülmüştür. XRD analizi Rietveld arıtımına bağlı Fullprof ve X'pert High Score yazılımları ile yapılmıştır. Tanecik yapısına ait fotoğraflar ZEISS EVO-40 marka SEM cihazı ile alınmıştır. Yüzeysel ve bileşik formülüne dair özellikler ise yine ZEISS EVO-40 marka SEM cihazının EDS ölçümü ile gerçekleştirilmiştir. Manyetizasyonun sıcaklığa ve uygulanan alan bağımlılığı, M(T) ve M(H), Quantum Design – Fiziksel Özelliklerin Ölçüm Sistemi (Physical Properties Measurement System, PPMS) Titreşimli Örnek Manyetometresi (VSM) modülü ile araştırılmıştır. M(T) analizi 10 dan 350 K değerine kadar değişen sıcaklık aralığında sıfır alan soğutmalı (ZFC) ve alan soğutmalı (FC) biçimde iki süreçte gerçekleştirilmiştir. ZFC sürecinde örnek manyetik alan uygulanmaksızın 10 K değerine kadar soğutulur ve sonrasında az miktarda manyetik alan uygulanarak (250 Oe) 10 K ile 350 K sıcaklık aralığında manyetizasyon ölçümü yapılır. FC sürecinde ise sıcaklık 350 K'den 10 K'e düşerken 250 Oe manyetik alan altında manyetizasyon ölçümü gerçekleştirilir.

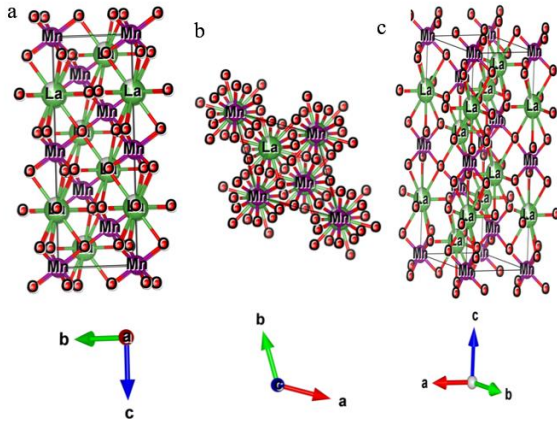
3. Bulgular ve Değerlendirmeler

Toz örneğin yapısı XRD tekniği ile analiz edilmiştir. Şekil 1. de görülen örneğin XRD kırınım desenleri çoklu kristal yapıyı işaret etmektedir.

Örneğin ana yapısının $R\bar{3}c$ uzay grubuna sahip rombohedral fazda olduğu belirlenmiştir. Ana faza ek olarak $Pbam$ uzay grubuna sahip ortorombik fazlı GdMn₂O₅ yapısına ait küçük şiddetli safsızlık pikleri de gözlenmiştir. REMn₂O₅ (RE: nadir toprak elementleri) yapısının manyetik olmayan doğasından dolayı [18], bu safsızlık fazının örneğin manyetokalorik davranışını etkilemediği söylenebilir. Rietveld arıtımından örneğin kristal yapısına ait elde edilen şekiller farklı açılarda Şekil 2. de gösterilmiştir.



Şekil 1. $(\text{La}_{0.9}\text{Gd}_{0.1})_{0.85}\text{Ag}_{0.15}\text{MnO}_3$ (LGAM-1) örneğine ait XRD kırınım deseni. Kırmızı yıldızlar elde edilen datayı, düz siyah çizgi hesaplanan datayı, mavi tikler ana fazı, kırmızı tikler GdMn_2O_5 fazını ve mavi düz çizgi ise hesaplanan ve elde edilen datanın farkını ifade etmektedir.



Şekil 2. $(\text{La}_{0.9}\text{Gd}_{0.1})_{0.85}\text{Ag}_{0.15}\text{MnO}_3$ örneğinin MnO_6 oktahedral yapılardan oluşan kristal yapısının üç farklı açıda gösterimi

Tablo 1: $\text{La}_{0.85}\text{Ag}_{0.15}\text{MnO}_3$ (LAM), $(\text{La}_{0.9}\text{Pr}_{0.1})_{0.85}\text{Ag}_{0.15}\text{MnO}_3$ (LPAM) ve $(\text{La}_{0.9}\text{Gd}_{0.1})_{0.85}\text{Ag}_{0.15}\text{MnO}_3$ (LGAM-1) numunelerine ait örgü parametreleri a, b ve c, birim hücre hacmi V, A-bölgesi ortalama iyonik yarıçapı r_A , uyumsuzluk etkisi σ^2 , Mn-O bağ uzunluğu, Mn-O-Mn bağ açısı değerleri. N.A.: İlgili çalışmada bildirilmeyen parametreleri ifade etmektedir.

Özellikler	LAM	LPAM-1	LGAM-1
a = b (Å)	5.522	5.519	5.5096
c (Å)	13.373	13.354	13.3693
V (Å ³)	353.240	352.379	351.463
r_A (Å)	0.1178	0.1175	0.1171
σ^2 (Å ²)	0.00184	0.00203	0.00261
Mn-O bağ uzunluğu (Å)	N.A.	N.A.	4.3395
Mn-O-Mn bağ açısı (θ)	N.A.	N.A.	159.83537
Referans	[19]	[19]	Mevcut Çalışma

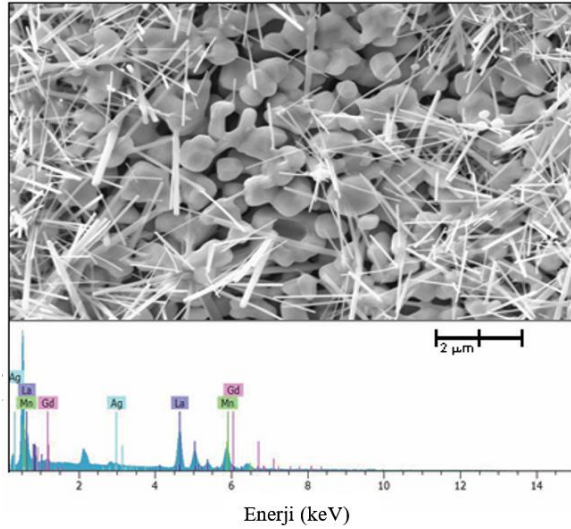
Örgü Parametreleri, birim hücre hacmi, Mn-O bağ uzunluğu, Mn-O-Mn bağ açısı, A-bölgesi ortalama iyonik yarıçapı ve uyumsuzluk etkisi katsayısı değerleri Tablo 1’de verilmiştir. Tablo 1’den görülebileceği üzere, örgü parametreleri Gd’nin $\text{La}_{0.85}\text{Ag}_{0.15}\text{MnO}_3$ yapısına girmesiyle azalmıştır. Bu durum Gd’nin La’dan daha düşük iyonik yarıçapa sahip olmasından kaynaklanmaktadır [20]. Yapısal ve manyetik özelliklerin arasındaki ilişkinin anlaşılması için örneğe ait A-bölgesi ortalama iyonik yarıçapını r_A , uyumsuzluk etkisi σ^2 , Mn-O bağ uzunluğu, Mn-O-Mn bağ açısı değerleri hesaplanmıştır.

Bir elementin iyonik yarıçapı daha küçük olan bir element ile yer değiştirmesi r_A ’nın azalmasına yol açar [21]. Tablo 1’den görülebileceği üzere, bu çalışmada da, r_A değerinin azalma göstermesi açıklanan ifadeyi desteklemektedir. Dahası r_A da meydana gelen azalma Denklem 1 ile hesaplanan, uyumsuzluk etkisini (σ^2) artırır [19].

$$\sigma^2 = \sum_i x_i r_i^2 - \langle r_A \rangle^2 \quad (1)$$

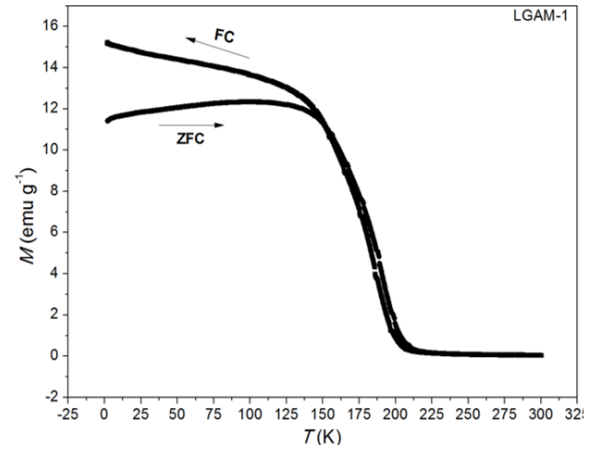
Bu sonuçlardan yola çıkarak r_A ’nın azalmasından MnO_6 oktahedral yapının büküldüğü söylenebilir ve bu sonuç Şekil 2’den de görülmektedir.

Yüzey özelliklerinin araştırılması için SEM görüntüleme tekniği kullanılmıştır. Örneğin SEM görüntüsü ve EDS spektrumu Şekil 3’de görülmektedir.



Şekil 3. (La_{0.9}Gd_{0.1})_{0.85}Ag_{0.15}MnO₃ örneği için SEM fotoğrafı ve EDS spektrumu

SEM fotoğrafından örneğin kare şekilli taneciklerden oluştuğu ve büyüklük bakımından homojen olmayan bir şekilde dağıldığı görülmektedir. 50 rastgele parçacık seçilerek hesaplanan ortalama tanecik büyüklüğü ise 0.91 μm olarak bulunmuştur. Ayrıca yapıda çubuksu yapıların da olduğu görülmektedir. Bu çubuksu yapılar XRD analizlerinde de tespit edilen GdMn₂O₅ yapısı ile ilgili olabilir. Örneğin EDS spektrumundan, örnekte olması beklenen elementlerin bulunduğu, üretim esnasındaki ısı işlemlerden herhangi bir elementin yapıdan uzaklaşmadığı ve herhangi başka bir safsızlık elementinin yapıda bulunmadığı görülmüştür.



Şekil 4. (La_{0.9}Gd_{0.1})_{0.85}Ag_{0.15}MnO₃ örneği için ZFC ve FC modunda sıcaklığa bağlı manyetizasyon grafiği

Örneğin manyetik özelliklerinin belirlenmesi adına sıcaklığa ve uygulanan alana bağlı mıknatıslanma özelliği kullanılmıştır. $M(T)$ ölçümleri 250 Oe alan altında 10 ile 350 K sıcaklık aralığında ZFC ve FC modunda yapılmıştır ve sonuçlar Şekil 4’de verilmiştir. Şekil 4’den FC modda sıcaklığın artırılmasıyla mıknatıslanmanın yavaşça azaldığı, manyetik faz geçiş sıcaklığına (T_C) gelindiğinde keskin bir düşüş sergilediği ve devamında neredeyse sıfır değerine geldiği görülmektedir. Örneğin ZFC modunda yüksek sıcaklıklarda FC moduna benzer bir davranış sergilediği fakat düşük sıcaklık bölgesine gelindiğinde daha düşük mıknatıslanma değerine sahip olduğu görülmektedir.

Tablo 2: La_{0.85}Ag_{0.15}MnO₃ (LAM), (La_{0.9}Pr_{0.1})_{0.85}Ag_{0.15}MnO₃ (LPAM) ve (La_{0.9}Gd_{0.1})_{0.85}Ag_{0.15}MnO₃ (LGAM-1) numunelerine ait manyetik faz geçiş sıcaklığı (T_C) ve manyetik entropi değişimi (ΔS_M) değerleri

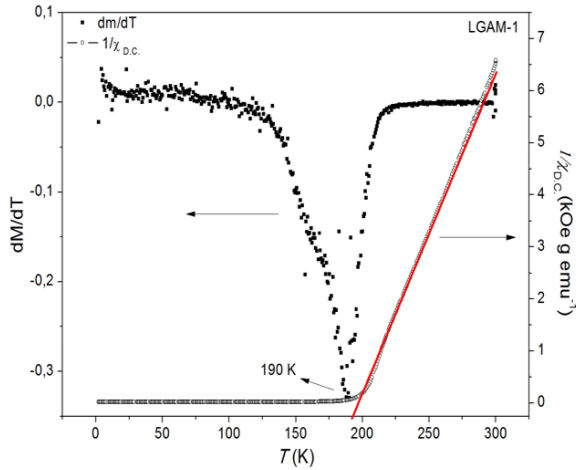
Özellikler	ΔH (kOe)	LAM	LPAM-1	LGAM-1
T_C (K)	-	262	232	190
	10	2.49	3.03	0.58
	20	4.40	4.73	0.96
$-\Delta S_M$ (J kg ⁻¹ K ⁻¹)	30	6.20	5.65	1.39
	40	7.43	6.41	1.89
	50	7.90	7.09	2.50
Referans		[19]	[19]	Mevcut Çalışma

Bu farklılık numunenin manyetik anizotropi ve domain duvarı çivileme etkisi özelliği ile ilişkilendirilebilir [5, 22]. Bir manyetik malzeme T_C civarından düşük sıcaklık bölgesine doğru soğutulurken, manyetik alan uygulamak ve

uygulamamak gibi iki ayrı işlem uygulandığında manyetik momentlerin farklı yönelimleri ve dolayısıyla net mıknatıslanma değerinde farklılık elde edilir. Eğer örnek manyetik domain duvarlarının içinde veya kristal sınırlarında

ferromanyetik olmayan safsızlık içerirse, ZFC-FC modlarındaki bu farklılık artar ve bu durum domain çivileme etkisini artırır [23].

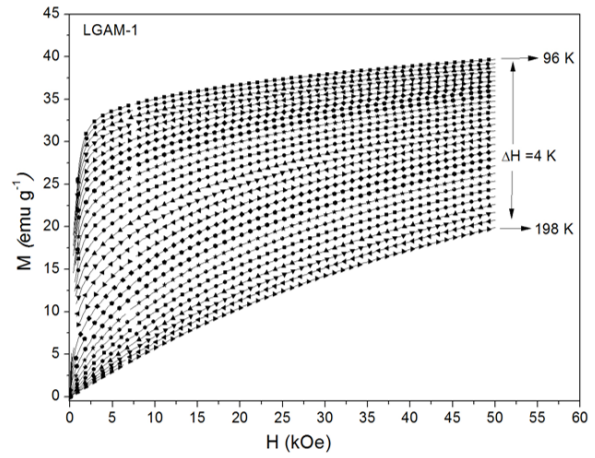
Örneğin T_C değeri iki farklı yolla bulunabilir. İlk yolda sıcaklığa bağlı dM/dT grafiğinin minimum noktası örneğin T_C değerini verir. Diğer yöntemde ise sıcaklığa bağlı ters duygunluk grafiğinin çizgisel olarak arttığı kısma çizilen extrapole çizgisinin sıfır noktasını kestiği x eksenini örneğin T_C değerini verir.



Şekil 5. $(\text{La}_{0.9}\text{Gd}_{0.1})_{0.85}\text{Ag}_{0.15}\text{MnO}_3$ örneği için ters duygunluk ve dM/dT değerlerinin sıcaklığa bağlılığı grafiği. **Sol eksen:** Sıcaklığa bağlı dM/dT grafiği. **Sağ eksen:** Sıcaklığa bağlı ters duygunluk grafiği ve örneğin T_C değerini gösteren kırmızı extrapole çizgisi

LGAM-1 örneğinin T_C değeri bahsedilen iki yolla da hesaplanmış ve elde edilen veriler Tablo 2’de verilmiştir. LGAM-1 örneğinin T_C değeri 190 K olarak belirlenmiştir. Tablo 2’deki diğer örneklerle sonuçları kıyaslamak anlamlı olacaktır. Tablo 2’den görüleceği üzere Gd eklenmesiyle LAM örneğinin T_C değeri 262 K’den 190 K değerine azalmıştır. T_C değerindeki bu azalma Tablo 1’den görülebilen, r_A , değerindeki azalma, σ^2 değerindeki artma, Mn-O bağ uzunluğundaki azalma ve Mn-O-Mn bağ açısının 180° ’den uzaklaşmasına bağlanabilir. r_A ’daki azalma Mn-O bağ uzunluğunun kısalması ve Mn-O-Mn bağ açısının 180° ’den uzaklaşmasına böylelikle MnO_6 oktahedral yapının bükülmesine neden olmaktadır. Bu bükülme Mn ile O iyonları arasında hareket edebilen transfer elektronlarının hareketlerinin kısıtlanmasına böylelikle de ÇDT mekanizmasının zayıflamasına yol açmaktadır. Ayrıca bükülme MnO_6 yapısının titreşimini artırır ve bu titreşimler de transfer

elektronlarının hareketlerinin kısıtlanmasına, dolayısı ile ÇDT mekanizmasının zayıflaması ve örneğin ferromanyetik doğasının zayıflamasına yol açmaktadır. Ayrıca artan σ^2 değeri de iletkenlik elektronlarının hareketini kısıtlayıcı yönde etki etmesi nedeniyle ÇDT mekanizması zayıflar ve zayıflayan ÇDT mekanizması T_C değerinin azalmasına neden olur. Şekil 6 LGAM-1 örneği için 96 ile 198 K sıcaklık aralığında 4 K’lik sıcaklık aralıklarıyla 50 kOe değerine kadar uygulanan alana karşı izotermal manyetizasyon eğrilerini $M(H)$ göstermektedir.

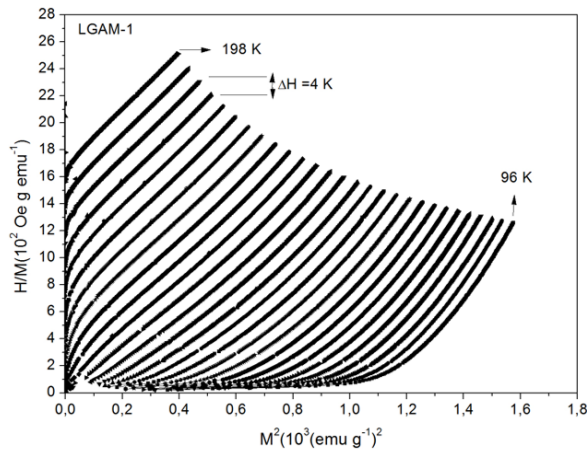


Şekil 6. $(\text{La}_{0.9}\text{Gd}_{0.1})_{0.85}\text{Ag}_{0.15}\text{MnO}_3$ örneği için izotermal manyetizasyon eğrileri

Şekil 6’dan görülebileceği üzere örnek T_C değerinin altındaki sıcaklıklarda uygulanan alanla birlikte hızlı bir mıknatıslanma artışı ve yüksek alanlarda doyum noktasına yaklaşma ile tipik bir ferromanyetik davranış göstermektedir. Eğriler yüksek sıcaklıklarda çizgisel bir şekilde artış göstermeye başlamaktadır. Bu durumda örneğin paramanyetik faza geçiş sergilediğini göstermektedir. Manyetik soğutucu malzemelerde, soğutma çevriminin sürekli olması çok önemlidir. Bu durumun gerçekleştiği malzemelerin manyetik faz geçişinin türü genellikle 2. dereceden olmaktadır. 1. Dereceden manyetik faz geçişi gösteren numunelerin termal ve manyetik histerezis göstermeleri bu numunelerin soğutucu eleman olarak kullanımını kısıtlamaktadır. Manyetik soğutucu malzemelerin manyetik faz geçişinin türünü belirlemek için Arrot grafiği şeklinde adlandırılan M^2 değerine karşılık H/M grafiği kullanılır. LGAM-1 örneği için değişik

sıcaklıklarda elde edilen Arrot grafiği Şekil 7’de görülmektedir.

Arrot grafiğindeki pozitif eğimli eğriler numunenin 2. dereceden manyetik faz geçişi gösterdiğini ima eder. Şekil 7’den LGAM-1 numunesinin de pozitif eğimli eğrilerinden dolayı 2. dereceden faz geçişi sergilediği görülmektedir. 2. Dereceden manyetik faz geçişi özelliği LGAM-1 örneği ihmal edilebilir düzeyde düşük termal ve manyetik histerezis gösterir, bu durum da örneğin MS sistemlerinde kullanılabilirliğini artırır.



Şekil 7. (La_{0.9}Gd_{0.1})_{0.85}Ag_{0.15}MnO₃ örneği için Arrot grafiği

Manyetik entropi değişim değeri (ΔS_M), değişik sıcaklıklardaki $M(H)$ eğrilerinden hesaplanır. Termodinamik teoriye göre ΔS_M

$$\Delta S_M = S_M(T, H) - S_M = \int_0^H \left(\frac{\partial S}{\partial H} \right)_T dH \quad (2)$$

ile verilir. Maxwell’in termodinamik ilişkisi

$$\left(\frac{\partial M}{\partial T} \right)_H = \left(\frac{\partial S}{\partial H} \right)_T \quad (3)$$

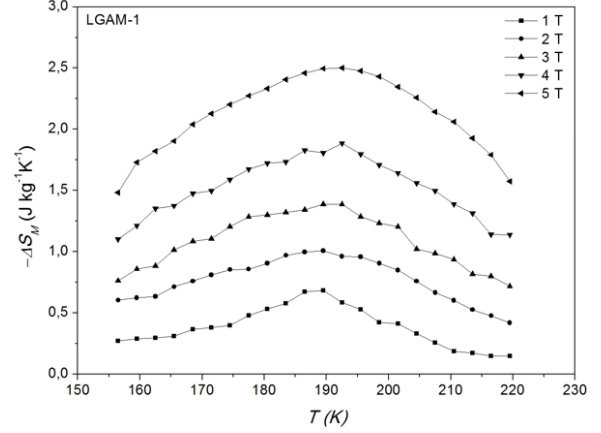
denklemi, 2 denkleminde uygulanırsa, aşağıdaki şekli alır.

$$\Delta S_M = \int_0^H \left(\frac{\partial M}{\partial T} \right)_H dT \quad (4)$$

Deneyssel dataların aralıklı olduğu düşünüldüğünde 4 denklemindeki integral için aşağıdaki denklem de uygulanabilir.

$$\Delta S_M = \sum_i \frac{M_i - M_{i+1}}{T_{i+1} - T_i} \Delta H_i \quad (5)$$

Örneğin ΔS_M değeri 4 denklemleri kullanılarak $M(H)$ eğrilerinden hesaplanır. Elde edilen ΔS_M değerleri Tablo 2’de ve Şekil 8’de verilmiştir.



Şekil 8. (La_{0.9}Gd_{0.1})_{0.85}Ag_{0.15}MnO₃ örneği için sıcaklığa bağlı ΔS_M grafiği.

$-\Delta S_M$ değerleri 1, 2, 3, 4 ve 5 T manyetik alan değişimleri için sırasıyla 0.58, 0.96, 1.39, 1.89 ve 2.50 J kg⁻¹ K⁻¹ şeklinde hesaplanmıştır. Tablo 2’den de görülebileceği gibi, LAM örneğine Gd eklenmesi veya LPAM örneğindeki Pr ile Gd elementinin yer değiştirmesi durumları incelendiğinde ΔS_M değerlerinin azalma gösterdiği görülmektedir. Bu azalmanın ÇDT etkileşmesinin zayıflamasına bağlı olarak numunenin ferromanyetik doğasının zayıflaması ve artan spin-fonon çiftlerini ile ilgilidir [4, 8]. Her ne kadar düşüş gösterse de ΔS_M değerleri literatürde sonuçları verilen diğer peroksit manganitlerle kıyaslanabilir düzeydedir.

4. Sonuçlar

Sonuç olarak, sol-jel yöntemiyle üretilen (La_{0.9}Gd_{0.1})_{0.85}Ag_{0.15}MnO₃ peroksit manganit numunesinde, La ile Gd elementinin kısmi yer değiştirmesinin yapısal, manyetik ve manyetokalorik özellikleri üzerine olan etkisi detaylı bir şekilde araştırılmıştır. XRD sonuçları örneğin $R\bar{3}c$ uzay gruplu rombohedral yapıda olduğunu fakat küçük miktarda GdMn₂O₅ yapısında safsızlık fazının da bulunduğunu göstermiştir. SEM analizi taneciklerin kare yapılı ve büyüklük bakımından homojen olmayan bir dağılımda olduğunu göstermiştir. EDS spektrumu örneğin beklenen tüm elementleri içerdiğini yani üretim esnasında kullanılan ısıtma işlemlerinin

elementleri yapıdan uzaklaştırmadığını ayrıca fazlardan bir safsızlık elementinin yapıda bulunmadığını göstermiştir. Örnek sıcaklığın artırılması ile 190 K şeklinde belirlenen T_C sıcaklığında ferromanyetik fazdan paramanyetik faza doğru ikinci dereceden manyetik faz geçişi göstermiştir. En yüksek manyetik entropi değişimi değeri 50 kOe alan değişiminde $2.5 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ 'dir. Bu sonuçlar ışığında üretilen numunenin orta sıcaklık aralığında tersinir bir MKE göstermesi nedeniyle manyetik soğutucu bir malzeme olarak kullanılabilirliğini göstermiştir.

Teşekkür

Bu çalışma Adıyaman Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Başkanlığı tarafından FEFBAP/2014-0008 proje numarası ile verilen proje aracılığı ile desteklenmiştir.

5. Kaynaklar

1. Gschneidner K.A. ve Pecharsky V.K. ve ark. (1996) *Rare Earths: Science, Technology & Applications iii*; The Minerals, Metals and Materials Society Warrendale Yayınları P.A. A.B.D. **41**: 213s.
2. Gschneidner K.A., Pecharsky V.K., Pecharsky A.O. ve Zimm C.B. (1999). *Recent developments in magnetic refrigeration*, in *Rare Earths '98*, Woodward, R. C., ed., 5: 69-73.
3. Tishin A.M., Derkach A.V., Spichkin Y.I., Kuz'min M.D., Chernyshov A.S., Gschneidner K.A. ve Pecharsky V.K., (2007). *Experimental critical exponents of "pure" ferromagnets: the cost of excessive proximity to T_C may be too high*. Journal of Magnetism and Magnetic Materials 310: 2800-2812.
4. Ayaş A.O., Akyol M., Çetin S.K., Akça G., Ekicibil A. ve Özçelik B., (2015). *Magnetocaloric Properties of $\text{La}_{0.85}\text{Ag}_{0.15}\text{MnO}_3$ and $(\text{La}_{0.80}\text{Pr}_{0.20})_{0.85}\text{Ag}_{0.15}\text{MnO}_3$ Compounds*. Journal of Superconductivity and Novel Magnetism 28: 1649-1653.
5. Kılıç Ç. S., Güneş M., Ekicibil A., Farle M., (2015). *Magnetocaloric effect in $(\text{La}_{1-x}\text{Sm}_x)_{0.67}\text{Pb}_{0.33}\text{MnO}_3$ ($0 \leq x \leq 0.3$) manganites near room temperature*. Journal of Alloys and Compounds 650: 285-292.
6. Tishin A.M., (2007). *Magnetocaloric effect: Current situation and future trends*. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, **5**: 351-357.

7. Ayaş A.O., Akyol M. ve Ekicibil A., (2016). *Structural and magnetic properties with large reversible magnetocaloric effect in $(\text{La}_{1-x}\text{Pr}_x)_{0.85}\text{Ag}_{0.15}\text{MnO}_3$ ($0.0 \leq x \leq 0.5$) compounds*. Philosophical Magazine 96: p. 922.
8. Phan M.-H. ve Yu S.-C., (2007). *Review of the magnetocaloric effect in manganite materials*. Journal of Magnetism and Magnetic Materials 308: p. 325.
9. Zener C., (1951). *Interaction Between the d Shells in the Transition Metals*. Physical Review 82: 440-443.
10. Millis A.J., Littlewood P.B. ve Shraiman B.I., (1995). *Double Exchange Alone Does Not Explain the Resistivity of $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$* . Physical Review Letters **74**: 5144-5147.
11. Goodenough J.B., Wold A., Amott R.J. ve Menyuk N., (1961). *Relationship Between Crystal Symmetry and Magnetic Properties of Ionic Compounds Containing Mn^{3+}* . Physical Review **124**: 373-384.
12. Selmi A., M'Nassri R., Cheikhrouhou-Koubaa W., Boudjada N.C. ve Cheikhrouhou A., (2015). *Effects of partial Mn-substitution on magnetic and magnetocaloric properties in $\text{Pr}_{0.7}\text{Ca}_{0.3}\text{Mn}_{0.95}\text{X}_{0.05}\text{O}_3$ (Cr, Ni, Co and Fe) manganites*. Journal of Alloys and Compounds 619: p. 627.
13. Hao C., Zhao B., Huang Y., Kuang G. ve Sun Y., (2011). *A-site-disorder-dependent magnetocaloric properties in the mono-valent-metal doped $\text{La}_{0.7}\text{Ca}_{0.3}\text{MnO}_3$ manganites*. Journal of Alloys and Compounds **509**: 5877-5881.
14. M'nassri R. and Cheikhrouhou A., (2014). *Evolution of Magnetocaloric Behavior in Oxygen Deficient $\text{La}_{2/3}\text{Ba}_{1/3}\text{MnO}_{3-\delta}$ Manganites*. Journal of Superconductivity and Novel Magnetism **27**: 1463-1468.
15. Nassri R.M., Cheikhrouhou-Koubaa W., Koubaa M. ve Cheikhrouhou A., (2012). *Effect of strontium substitution on the physical properties of $\text{Nd}_{0.5}\text{Ca}_{0.5-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ ($0.0 \leq x \leq 0.5$) manganites*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering **28**: p. 012050.
16. M'nassri R., Cheikhrouhou-Koubaa W., Boudjada N. ve Cheikhrouhou A., (2013). *Effect of Ni Doping on the Structural, Magnetic and Magnetocaloric Properties of $\text{Pr}_{0.7}\text{Ca}_{0.3}\text{Mn}_{1-y}\text{Ni}_y\text{O}_3$ Manganites*. Journal of Superconductivity and Novel Magnetism **26**: p. 1429.
17. Ayaş A.O., Akyol M., Çetin K. S., Kaya M., Dinçer İ., Ekicibil A. ve Elerman Y., (2017). *Room temperature magnetocaloric effect in $\text{Pr}_{1.75}\text{Sr}_{1.25}\text{Mn}_2\text{O}_7$ double-layered perovskite manganite system*. Philosophical Magazine **97**: 671-682.

18. Muñoz A., Alonso J.A., Martínez-Lope M.J., Pomjakushin V. ve André G., (2012). *On the magnetic structure of PrMn₂O₅: a neutron diffraction study*. Journal of Physics: Condensed Matter 24: 076003-076011.
19. Ayaş A.O., Akyol M. ve Ekicibil A. (2016). *Structural and magnetic properties with large reversible magnetocaloric effect in (La_{1-x}Pr_x)_{0.85}Ag_{0.15}MnO₃ (0.0 ≤ x ≤ 0.5) compounds*. Philosophical Magazine 96: p. 922-937.
20. Shannon R.D., (1976). *Revised effective ionic radii and systematic studies of interatomic distances in halides and chalcogenides*. Acta Crystallographica Section A 32: 751-767.
21. Kolat V.S., İzgi T., Kaya A. O., Bayri N., Gencer H., ve Atalay S., (2010). *Metamagnetic transition and magnetocaloric effect in charge-ordered Pr_{0.68}Ca_{0.32-x}Sr_xMnO₃ (x=0, 0.1, 0.18, 0.26 and 0.32) compounds*. J. Magn. Magn. Mater. 322:427–433.
22. Joy P.A., Kumar P.S.A. ve Date S.K., (1998). *The relationship between field-cooled and zero-field-cooled susceptibilities of some ordered magnetic systems*. Journal of Physics-Condensed Matter 10: 11049-11054.
23. Taşarkuyu E., Coşkun A., Irmak A. E., Aktürk S., Ünlü G., Samancıoğlu Y., Yücel A., Sarıkürkçü C., Aksoy S. ve Acet M., (2011). *Effect of high temperature sintering on the structural and the magnetic properties of La_{1.4}Ca_{1.6}Mn₂O₇*. Journal of Alloys and Compounds 509: p. 3717-3722.

Bir Fazlı Asenkron Motor V/f Hız Kontrolü

Zeynep Bala DURANAY, Hanifi GÜLDEMİR

Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Elazığ
zbduranay@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 14.04.2017; Kabul/Accepted: 06.06.2017)

Özet

Bir fazlı asenkron motorlar küçük güç gerektiren ev aletleri ve üç fazın olmadığı endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Değişken hız gerektiren uygulamalarda bu motorların hızlarının kontrol edilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada bir fazlı asenkron motorların yapıları dikkate alınarak hızlarının ne şekilde değiştirilebileceği detaylı olarak ortaya konulmuş ve hangi yöntemlerle değiştirilebileceği incelenmiştir. Bir fazlı motorun yardımcı sargı ve yardımcı sargı olmadan ürettiği hız-moment karakteristiği elde edilmiş ve verilmiştir. Motora uygulanan gerilimin değiştirilmesi, uygulanan geriliminin frekansının değiştirilmesi ile motor hızının nasıl değiştiği ile ilgili benzetimler yapılmıştır. Son olarak V/f kontrolü yapılarak performansı incelenmiş ve benzetimi yapılarak sonuçlar verilmiştir. Benzetim sonuçlarından V/f kontrollü bir fazlı motorun verilen referans hızı iyi bir şekilde takip ettiği görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Bir Fazlı Motor, V/f Kontrolü, Frekans Kontrolü, Gerilim Kontrolü, Eşdeğer Devre, Döner Alan

V/f Speed Control of Single Phase Induction Motor

Abstract

Single-phase induction motors are widely used in low power industrial and domestic applications where tri phase is unavailable. It is required to control the speed of the motor when the application need variable speed. In this study, how the speed of a single phase induction motor is examined and the methods for speed change is given by considering its structure. Torque-speed characteristics of single phase induction motor both with and without auxiliary winding are obtained and presented. Simulations are done on changing speed by changing input voltage, changing frequency of the input voltage. Finally the performance of V/f controlled single phase induction motor is examined. Simulations are made with different speed references and results are presented. The results show that the V/f controlled single phase induction motor has a good speed tracking performance. Simulations are realized in MATLAB/Simulink environment.

Keywords: Single-Phase Induction Motor, V/f Control, Frequency Control, Voltage Control, Equivalent Circuit, Rotating Field.

1. Giriş

Asenkron motorlar basit yapısı ve sağlam oluşundan dolayı yerleşim yerlerinde, endüstride ve ticari alanlardaki birçok uygulamalarda yaygın bir şekilde kullanım alanı bulmaktadır. Bu uygulamalarda kullanılmalarının başlıca sebepleri sağlam bir yapıya sahip olması, bakım gerektirmemesi, sık arıza yapmamlarından dolayı işletme maliyetlerinin de oldukça düşük olmasıdır [1].

Bu motorların bir fazlı olanları ise, havalandırma, klima, pompa ve ısıtma gibi ev aletlerinde ve endüstriyel kontrol sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır [2]. Bu tür

uygulamaların çoğu sabit bir hız gerektirmektedir [3].

Bir fazlı motorların kullanıldığı değişken hızlı sürücü sistemlerinin denetimi için birçok denetim yöntemi geliştirilmiştir [4-9]. Bunlar arasında skaler kontrol yöntemi olarak adlandırılan V/f kontrolü basitliği ve etkinliği bakımından en yaygın kullanılan yöntemlerden birisidir [1, 10].

Bu çalışmada, evirici üzerinden beslenen tek-fazlı asenkron motorun V/f kontrol tekniği kullanılarak hız kontrolünün gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. Tek fazlı motorun farklı referans hız değerlerinde ve farklı yüklerdeki performansı Matlab/simulink benzetim programı ile incelenmiş ve benzetim sonuçları verilmiştir.

2. Bir Fazlı İndüksiyon Motor

Çalışması, senkron hızla dönen manyetik alanların rotoru etkilemesiyle üretilen momentin rotoru döndürmesi prensibine dayanmaktadır. Üç fazlı indüksiyon motorlarda, dönen manyetik alan, 120° faz farklı akımların, 120° faz farkıyla yerleştirilmiş sargılara uygulanması ile oluşturulmaktadır. Ancak bir fazlı motorlarda tek sargı ile döner manyetik alan oluşturulamadığından başlangıç döndürme momenti de oluşmamaktadır.

2.1 Döner alan teorisi

Bir fazlı asenkron motorlar genel olarak çift döner alan teorisi kullanılarak modellenmektedir [11]. Bir fazlı asenkron motorun stator sargısına sinüzoidal bir akım $I = I_m \sin \omega t$ uygulandığında bu gerilimin oluşturduğu değişken akım sargı düzlemine dik ekseninde bir manyetik alan meydana gelir. Bu durumda oluşan manyetomotor kuvvetin ifadesi,

$$F = \frac{2}{\pi} NI \sin\left(\frac{P}{2}\theta\right) \quad (1)$$

olarak verilmiştir [11]. Sargıya uygulanan akımın değeri yerine konulduğunda,

$$\begin{aligned} F &= I_m \sin \omega t \sin\left(\frac{P}{2}\theta\right) \\ &= F_m \sin \omega t \sin\left(\frac{P}{2}\theta\right) \end{aligned} \quad (2)$$

manyetomotor kuvvet (mmk) oluşur. Trigonometrik eşitlik,

$$\sin x \sin y = \frac{1}{2} \cos(x - y) - \frac{1}{2} \cos(x + y) \quad (3)$$

kullanılarak,

$$\begin{aligned} F &= F_f + F_b \\ &= \frac{1}{2} F_m [\cos\left(\omega t - \frac{P}{2}\theta\right) - \cos\left(\omega t + \frac{P}{2}\theta\right)] \end{aligned} \quad (4)$$

elde edilir. Böylece sargıda birbirine zıt yönde dönen pozitif ve negatif değerler olarak değişen iki eşit genlikli manyetik alan meydana gelir.

$$s_f = \frac{\omega_{sf} - \omega_m}{\omega_{sf}} \quad (5)$$

$$s_b = \frac{\omega_{sb} - \omega_m}{\omega_{sb}} = \frac{-\omega_{sf} - \omega_m}{-\omega_{sf}} \quad (6)$$

olarak ileri ve geri yönde dönen alanların her biri için kayma denklemi yazıldığında (s_f , s_b) ve denklem (5)'den ω_m çekilip denklem (6)'da yerine konulduğunda,

$$s_b = 2 - s_f \quad (7)$$

olarak bulunur.

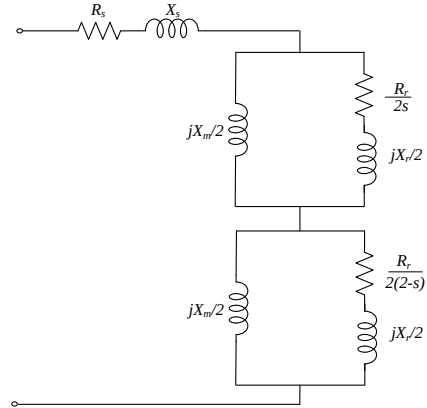
Bu ifadelerdeki ω_{sf} , ω_{sb} , ω_m sırasıyla rad/s cinsinden ileri yönde hareket eden alanın senkron hızı, geri yönde hareket eden alanın senkron hızı ve mekanik hızdır. Bu durumda ileri yönde hareket eden dalga için kayma s olarak alındığında geri yönde hareket eden dalga için kayma değeri $2-s$ olarak elde edilir.

Bu alanlar ile rotor çubuklarında indüklenen akım birbirinin tersi yönde momentler üretir (T_f , T_b). Sargının oluşturduğu toplam moment ise,

$$\begin{aligned} T &= T_f + T_b = \frac{P_f}{\omega_{sf}} + \frac{P_b}{\omega_{sb}} \\ &= \frac{1/2(I_f^2 R_r / s_f)}{\omega_m} - \frac{1/2(I_f^2 R_r / (2-s_f))}{\omega_m} \end{aligned} \quad (8)$$

dir. Burada P_f ve P_b ileri ve geri yöndeki alanların oluşturduğu güç ve R_r ise rotor sargı direncidir.

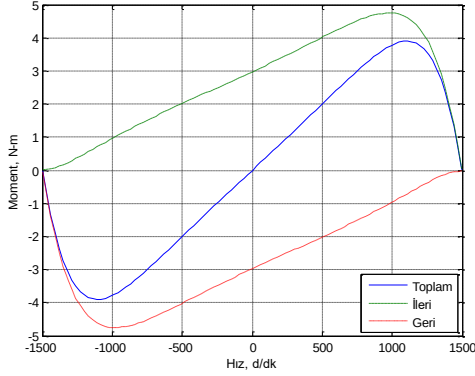
Bu döner alan teorisine göre bir fazlı asenkron motorun eşdeğer devresi Şekil 1'de verilmiştir [12].



Şekil 1. Bir fazlı indüksiyon motor eşdeğer devresi

İleri ve geri yöndeki akımların oluşturduğu moment ifadeleri ile toplam moment ifadesinin hıza göre değişimi Şekil 2'de çizdirilmiştir. Şekil 2'den görüldüğü üzere sargının oluşturduğu toplam moment sıfır olduğundan motor döndürme momenti üretemez. Bu durum (8) ifadesinde $s=1$ ($\omega_m=0$) konularak da görülmektedir.

Başlangıç anında döndürme momenti oluşmadığından bir fazlı asenkron motorlar sadece ana sargı ile kalkınamazlar.



Şekil 2. Bir fazlı indüksiyon motorda ileri ve geri dönen alanların oluşturduğu hız-moment karakteristiği

Motorun herhangi bir müdahale olmadan kendi kendine dönebilmesi için motora ikinci bir sargı (yardımcı sargı) eklenir. Bu durumda hava aralığında oluşan mmf her bir sargı için,

$$F_a = \frac{2}{\pi} N I_a \cos\left(\frac{p}{2} \theta\right) \quad (9)$$

$$F_y = \frac{2}{\pi} N I_b \cos\left(\frac{p}{2} \theta\right) \quad (10)$$

$$F_g = F_a + F_y \quad (11)$$

Bu sargılara aynı genlikli 90° faz farklı akımlar uygulandığında,

$$\cos(x - y) = \cos x \cos y + \sin x \sin y \quad (12)$$

trigonometrik eşitliği kullanılıp,

$$F_m = \frac{2}{\pi} N I_m \quad (13)$$

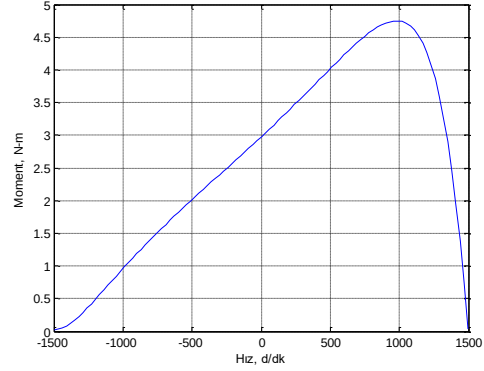
alındığında,

$$F_g = F_m \cos\left(\omega t - \frac{p}{2} \theta\right) \quad (14)$$

elde edilir. Bu ifade sabit genlikli hareket eden bir manyetik alan ifadesidir. Böylece ikinci bir sargı eklenerek döner bir manyetik alan oluşması sağlanmaktadır.

Sonuç olarak ana ve yardımcı sargı ile iki fazlı bir sistem elde edilir. Bu durumda statordaki iki fazlı sargılar döner manyetik alan meydana getirir. Oluşan manyetik alan rotor kısa devre çubuklarını keserek rotorda bir gerilim indükler. Rotor çubuklarından akan kısa devre akımları ile etkileşen manyetik alan bir moment üreterek motorun kendi kendine dönebilmesini

sağlamış olur. Şekil 3'de ana ve yardımcı sargıları bulunan bir fazlı asenkron motorun hız moment grafiği verilmiştir. Başlangıç anında ($n=0$) motorun döndürme momenti ürettiği görülmektedir.



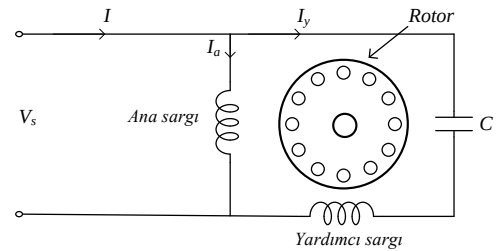
Şekil 3. Yardımcı sargılı bir fazlı indüksiyon motor hız-moment karakteristiği

Bir fazlı indüksiyon motorların kendi kendine dönebilmesini sağlayabilmek için başlatma yöntemine göre değişik tipleri vardır.

i-) Yardımcı sargılı bir fazlı indüksiyon motor: Bu tip bir fazlı indüksiyon motorun ana ve yardımcı sargı olmak üzere iki stator sargısı bulunmaktadır. Bu sargılar bir birlerine 90 derece faz farkıyla yerleştirilmişlerdir. Kendi kendine yol alabilmektedir.

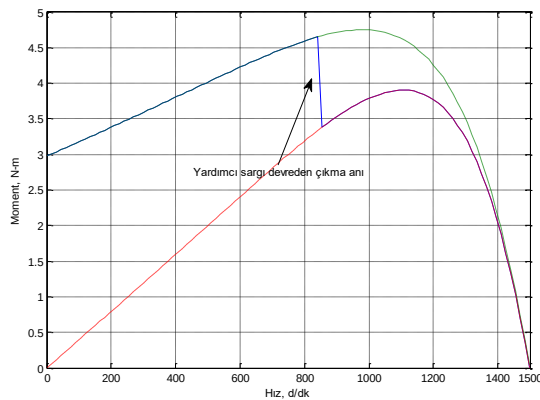
ii-) Kondansatör başlatmalı bir fazlı indüksiyon motor: Bu tip motorda ana sargı ile yardımcı sargı akımları arasındaki faz farkını artırmak için kondansatör kullanılır. Motor belirli bir hıza ulaştığında kondansatör ile yardımcı sargı devreden çıkarılır.

iii-) Sürekli kondansatörlü bir fazlı indüksiyon motor: Bu tür motorların iki çeşidi vardır. Birinde, Şekil 4'de olduğu gibi, yardımcı sargı ile kondansatör sürekli devrededir. Diğerinde ise yardımcı sargı ile birlikte iki adet kondansatör kullanılır. Bunlardan bir tanesi motoru başlatma anında diğeri ise hem başlatma anında hem de motor çalışırken devrededir.



Şekil 4. Bir fazlı indüksiyon motor

Yardımcı sargı ile kondansatör motorun başlangıç anında bir döndürme momenti üreterek motorun dönebilmesini sağlamak amacıyla kullanılmaktadır. Motor dönmeye başladıktan sonra artık bunlara gerek kalmamaktadır. Bu yüzden yardımcı sargı ve kondansatör motor hızının belirli bir dereceye ulaşması ile çeşitli yöntemlerle devreden çıkartılır. Yardımcı sargılı bir fazlı motorun hız moment diyagramı Şekil 5’de verilmiştir. Şekildeki mavi eğri yardımcı sargı ile ana sargının birlikte ürettiği momenti, kırmızı tek başına ana sargının ürettiği momenti göstermektedir. Yardımcı sargının devreden çıkarılmasından itibaren motor sadece ana sargının ürettiği momentle çalışmasını sürdürmektedir.



Şekil 5. Bir fazlı yardımcı sargılı indüksiyon motor hız-moment karakteristiği

Bütün bu motor tiplerinde ana sargı ile yardımcı sargı akımları arasında faz farkı oluşturularak dönen manyetik alan üretilir. Bunun yerine kondansatör kullanmadan, inverterler kullanılarak sargılara aralarında 90 derece faz farkı bulunan akımlar uygulanarak da, motorun dönebilmesi için gerekli olan döner manyetik alan üretilabilmektedir.

3. Hız Kontrol Yöntemleri

Sincap kafesli asenkron motorların sürekli hal eşdeğer devresinden,

$$Z_f = j \frac{X_m}{2} \left\| \left(\frac{1}{2} \frac{R_r}{s_f} + j \frac{1}{2} X_r \right) \right. \quad (15)$$

$$Z_b = j \frac{X_m}{2} \left\| \left(\frac{1}{2} \frac{R_r}{2-s_f} + j \frac{1}{2} X_r \right) \right. \quad (16)$$

$$Z_s = R_s + jX_s \quad (17)$$

$$Z_{in} = Z_s + Z_f + Z_b \quad (18)$$

$$\bar{I}_1 = \frac{\bar{V}_1}{Z_{in}} \quad (19)$$

ve

$$\bar{I}_f = \frac{j_2^1 X_m}{Z_f + jX_m} \bar{I}_1 \quad (20)$$

$$\bar{I}_b = \frac{j_2^1 X_m}{Z_b + jX_m} \bar{I}_1 \quad (21)$$

Bu durumda üretilen moment

$$T = T_f + T_b = \frac{P_f}{w_{sf}} + \frac{P_b}{w_{sb}}$$

$$= \frac{1/2(I_f^2 R_f / s_f)}{w_m} - \frac{1/2(I_f^2 R_f / (2 - s_f))}{w_m} \quad (22)$$

I_f ile I_b ifadelerindeki I_1 yerine (19) ifadesi yazıldığında,

$$T = \frac{1}{2} R_r p \left[\frac{1}{s\omega_s} - \frac{1}{(2-s)\omega_s} \right] I_f^2 \quad (23)$$

olarak elde edilir. Bu ifadeden motorun hızının değiştirilmesi

- Motorun kutup sayısının değiştirilmesi
- Motora uygulanan gerilimin değiştirilmesi
- Motora uygulanan gerilimin frekansının değiştirilmesi ile mümkün olabilmektedir.

3.1 Motorun kutup sayısının değiştirilmesi

Alternatif akım ile çalışan elektrik motorlarında senkron hız ve nominal hız olmak üzere iki hız kavramı kullanılmaktadır. Senkron hız motorun ürettiği elektromanyetik alanın hızı olup motorun yüksüz ve sürtünmesiz çalışması durumundaki teorik hızdır.

Senkron hızı etkileyen iki faktör vardır. Bunlar, motorun beslendiği kaynağın frekansı ve motorun stator sargılarının kutup sayısıdır. Senkron hız,

$$n_s = \frac{120.f}{p} \quad (24)$$

şeklinde verilmektedir. Burada f , kaynak frekansı p ise kutup sayısıdır.

Kutup sayısı ile senkron hız ters orantılıdır. Kutup sayısını değiştirerek hız kontrolü ancak kademeli olarak yapılabilmektedir. Bunun da yapılabilmesi için motor sargıları kutup sayısının değiştirilebilmesini sağlayacak şekilde özel

olarak oluşturulmalıdır. Bu şekildeki hız ayarı ancak birkaç kademe ile sınırlıdır.

3.2 Motora uygulanan gerilimin değiştirilmesi

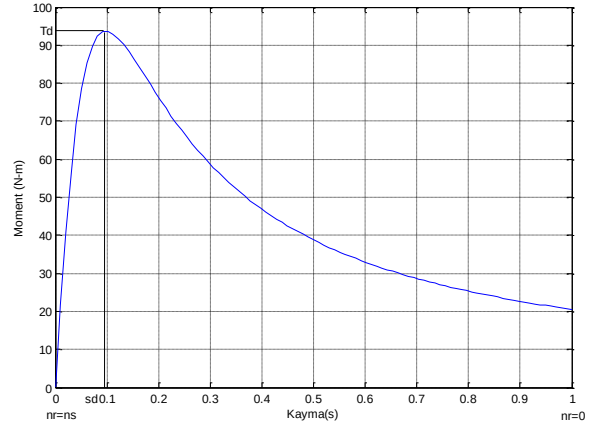
Asenkron motorun hızının kontrol edilmesinde, basitliği, ucuzluğu sebebiyle yaygın kullanılan yöntem motora uygulanan gerilimin kontrol edilmesi yöntemidir.

Motorun rotor hızı döner manyetik alanın hızından farklıdır. Motor hızı senkron hız değerine ancak boş çalışma durumunda yaklaşabilmektedir. Boş çalışma durumunda dahi motor milindeki sürtünmeden dolayı rotor hızı senkron hızın altındadır. Motorun, yük altındaki rotor hızı ya da mil hızı her zaman senkron hızdan daha düşüktür. Senkron hız ile rotor hızı arasındaki yüzde cinsinden ifade edilen fark kayma olarak adlandırılmakta olup

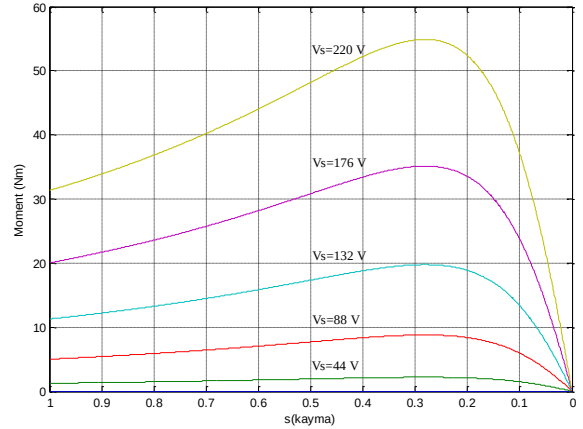
$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad (25)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada n_s , senkron hızı, n_r , rotor hızını ve s ise kaymayı ifade etmektedir.

Asenkron motorun moment ve hız ifadeleri dikkate alındığında nominal gerilim ve frekansla beslenen motorun ürettiği momentin kaymaya bağlı olarak değişimi Şekil 6'da verilmiştir. Motorun karalı çalışma bölgesi senkron hıza karşılık gelen $s=0$ ile maksimum momente karşılık gelen devrilme moment (s_d) arasındaki doğrusal bölgedir. Motora uygulanan gerilimin değiştirilmesi ile motor hızı ancak bu dar alanda değiştirilebilmektedir. Motora uygulanan gerilimin değiştirilmesi ile motor hızı ancak bu dar alanda değiştirilebilmektedir. Motorun oluşturduğu moment uygulanan gerilimin karesi ile değişmektedir.



Şekil 6. Asenkron motor hız-moment karakteristiği



Şekil 7. Farklı gerilimlerle elde edilen hız-moment karakteristiği

Motora uygulanan gerilimin azaltılması momentte büyük bir düşüşe neden olmaktadır. Buna karşılık gerilimin değiştirilmesinin senkron hız ve maksimum momentin üretildiği devrilme kayması üzerine bir etkisi yoktur. Bu durum Şekil 7'de değişik gerilimler için verilen hız-moment karakteristiğinden de görülmektedir.

Bu nedenlerden dolayı sabit yük momentinde motorun hızı çok küçük bir aralıkta yapılabilmektedir.

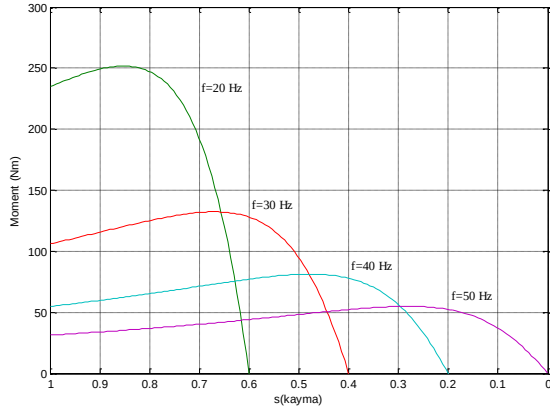
3.3 Motora uygulanan gerilimin frekansının değiştirilmesi

Yukarıdaki ifadeden motor hızının frekansla doğru orantılı, kutup sayısı ile ters orantılı olduğu görülmektedir. Bir motorun kutup sayısı, motorun tasarımı aşamasında belirlenip sabit olduğundan, motorun hızının değiştirilmesi

kaynak frekansının değiştirilmesiyle mümkün olmaktadır.

Nominal gerilim ve şebeke frekansı ile çalışan tam yükteki motor hızı baz hız olarak alındığında, frekansın, şebeke frekansının altında veya üzerinde değiştirilmesiyle motor hızı, baz hızın altında veya üzerinde değiştirilebilmektedir.

Motorun hızını senkron frekans ile motorun beslediği yük belirlemektedir. Motor hızı, senkron hız ile maksimum momentin olduğu devrilme hızı arasında değiştirilebilmektedir. Motor hızını azaltmak için, motora uygulanan gerilimin frekansı düşürüldüğünde makinenin maksimum momentinin arttığı görülmektedir (Şekil 8).



Şekil 8. Farklı frekanslar ile elde edilen hız-moment karakteristiği

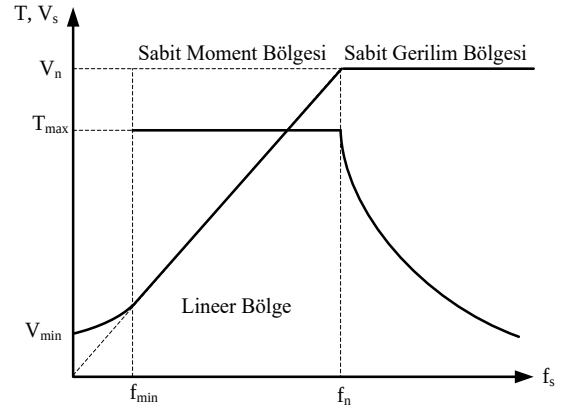
Frekansın azalması ile maksimum momentin artması, motorun bu kapasiteyi kullanabilecek bir yükü yüklenemeyeceğinden bir fayda sağlamaz. Motorun şebekeden gereksiz yüksek akım çekmesine neden olur. Bu akımlar düşük hız seviyelerinde çok büyük değerlere ulaşmaktadır. Bu nedenlerden dolayı frekansın değiştirilerek yapılan hız kontrolünde hız senkron hız ile sıfır hız arasında geniş bir aralıkta yapılabilmesine rağmen düşük hızlara inildikçe artan akımlar ve bunların sebep olduğu doyum ve kayıplar nedeniyle kullanılmamaktadır.

4. Gerilim/Frekans (V/f) Hız-Moment Eğrileri

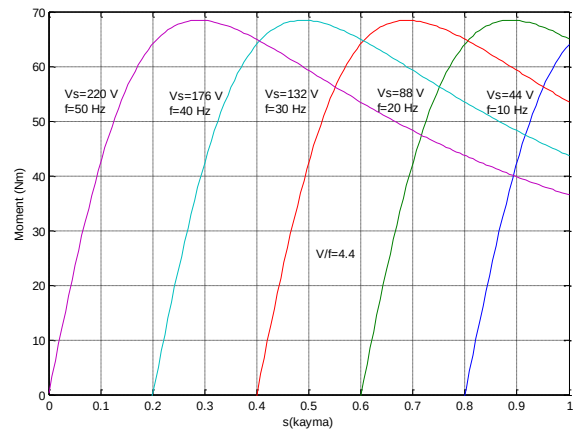
Asenkron motorun sürekli rejimdeki moment ifadesindeki gerilim/frekans oranı sabit tutulduğunda, motorun hızı, düşük hızlar hariç, geniş bir aralıkta kontrol edilebilmektedir. Bu durumda maksimum moment değeri hız kontrol

aralığında sabit kalmakta ve belli bir yük için makinenin çektiği akım da değişmemektedir.

Düşük hızlarda stator sargı direnci üzerindeki gerilim düşümü önemli olduğundan, düşük hızlarda uygulanan gerilim, bu gerilim düşümünü de karşılayacak şekilde belirlenen gerilim/frekans oranından büyük seçilmektedir. Şekil 9, V/f kontrol tekniğinin temeli olan gerilim/frekans değişim eğrisini göstermektedir. Şekil 10'da V/f oranı sabit tutularak farklı gerilim ve frekanslar için motorun hız moment değişimi verilmiştir. Düşük hız aralığı dışında gerilim/frekans oranı doğrusal olarak alınmaktadır. Senkron hız değeri üzerinde hız ayarı yapılabilmesi frekansın nominal frekansın üzerine çıkarılması ile olur. Ancak V/f oranının sabit kalması için uygulanan gerilimin de nominal gerilimin üzerine çıkarılması gerekir.



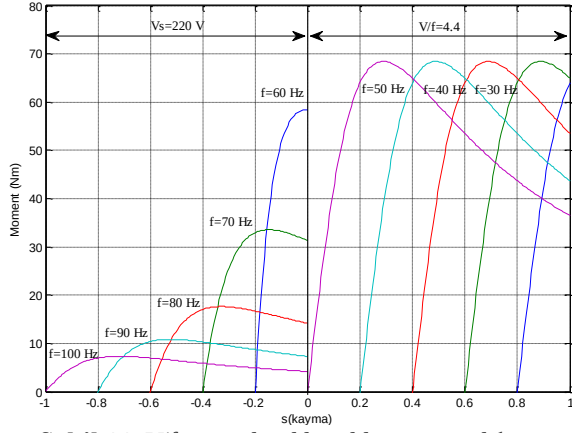
Şekil 9. Gerilim/frekans değişim eğrisi



Şekil 10. Sabit V/f oranı ile elde edilen hız-moment karakteristiği

Gerilimin nominal gerilim değerinden yüksek olması sargılar açısından problem

oluşturacağından, nominal frekanslar üzerindeki frekanslarda gerilim sabit tutulur (Şekil 11).

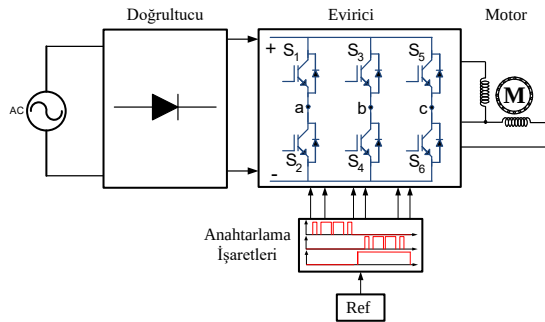


Şekil 11. V/f oranı ile elde edilen nominal hızın altında ve üstünde hız-moment karakteristiği

5. V/f Hız Kontrolü

Bir fazlı bir asenkron motorun hızının değiştirilmesinin en basit yolu motor sargılarına uygulanan gerilimin değiştirilmesidir. Ancak bu durumda hız çok dar bir alanda değiştirilebilmektedir [13]. Hızın geniş sınırlar içerisinde değiştirilmesi motor sargılarına uygulanan gerilimin frekansının değiştirilmesi ile sağlanabilmektedir.

Şekil 12’de bir motorun kaynak frekansının değiştirilerek, hızının elektronik olarak kontrol edilmesine yönelik blok diyagramı gösterilmektedir.



Şekil 12. Değişken Hızlı Sürücü Blok Diyagramı

Doğrultucu kısmı, sabit frekanslı kaynak gerilimini doğru gerilime dönüştürerek doğrultulmuş gerilimin dalgalanmalarını giderip daha düzgün ve kararlı bir doğru gerilim sağlar. Evirici ise girilen referans değere göre frekansı değiştirilebilen bir alternatif gerilimi motor için üretir.

Bir alternatif akım motoru, dönen manyetik alanın akı etkisiyle bir moment üretmektedir. Akı sabit tutularak tam yük momenti üretilir. Frekansın değiştirilmesiyle hız kontrolünde nominal hızın altında, akıyı sabit tutmak için sabit bir gerilim-frekans oranı (V/f) motora uygulanır.

Motor hızının düşürülmesi için, frekans düşürüldüğünde bu oran artacağından motor akımı da artar ve aşırı bir artış olabilir. Frekans artırılarak bu oran düşürüldüğünde, motorun momentinde düşüş meydana gelir. Nominal hız üstünde sabit gerilim (nominal gerilim) uygulandığında bu oran azalmaktadır. Bu durumlarda, nominal hızın üzerinde motorun momenti azalmaktadır.

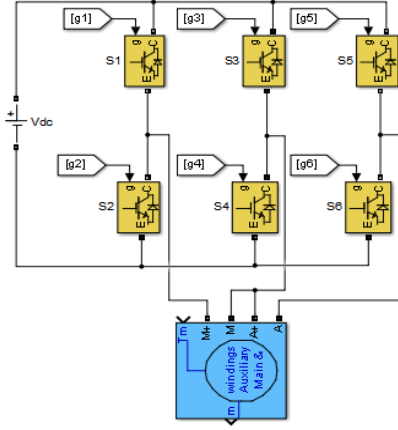
Nominal hız ve altında, motor hafif yüklü iken, gerilim-frekans oranı (V/f) ayarlanarak motor akımının azaltılıp minimum olması sağlanır. Bu ayarlama, motora uygulanan gerilimi azaltır ve motorun mıknatıslanma akımını düşürür. Sonuç olarak motor daha düşük moment üretir. Motor yükünün tipine bağlı olarak, özellikle sıfıra yakın hızlarda, motorun yeterli momenti üretebilmesi için, motor gerilimi artırılabilir. Bu ayarlama gerilim-yükseltmesi olarak adlandırılır. Bu kontrol yöntemi popüler bir yöntem olup, sabit V/f kontrolü olarak adlandırılır. Kondansatörlü bir fazlı asenkron motorlarda frekans değiştiğinde motorun kapasitif reaktansı da değişeceğinden V/f tekniği ile hız kontrolü uygulanamamaktadır.

V/f hız kontrol yönteminde motorun oluşturduğu manyetik alanın sabit kalması sağlanmaktadır. Genel olarak motora uygulanan gerilimin frekansa oranı (V/f) sabit tutulduğunda motorun ürettiği manyetik alan da sabit kalmaktadır. Bu işlem skalar kontrol yöntemi olup V/f kontrolü olarak adlandırılmaktadır.

Bu hız kontrol tekniğinde, darbe genişlik modülasyon kontrollü bir eviriciden üretilen değişken frekanslı bir gerilim motora uygulanır (Şekil 13).

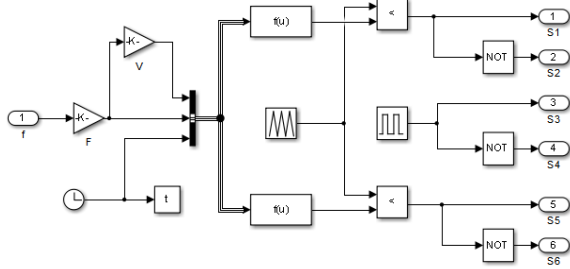
Çalışma aralığında sabit bir moment elde edilmesini sağlamak için motora uygulanan gerilimin frekansa oranı (V/f) sabit tutulur. Bu hız kontrol tekniği oldukça basit ve aynı zamanda ekonomik olduğunda özellikle açık çevrim sistemlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Böyle bir sistemde uygun anahtarlama işaretleri üretilerek, üç kollu bir

inverter ile ana ve yardımcı sargılar beslenecek şekilde bağlanmaktadır. Ana sargı ile yardımcı sargı anahtarlamaları arasına kısa bir gecikme süresi konularak başlangıç momenti elde edilmektedir.

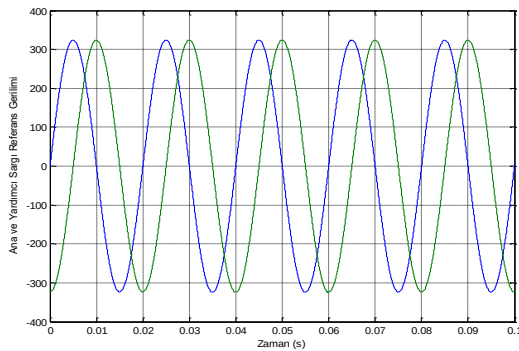


Şekil 13. Üç kollu evirici

Ana ve yardımcı sargılara uygulanacak anahtarlama işaretlerinin üretilmesi için V/f bloğundan V/f oranına bağlı olarak elde edilen referans gerilim ve anahtarlama işaretlerinin üretilmesine ilişkin simülük bloğu Şekil 14’de ve bu bloktan elde edilen referans gerilimler Şekil 15’de verilmiştir.



Şekil 14. V/f oranına bağlı anahtarlama işaretleri üretimi Simulink Programı

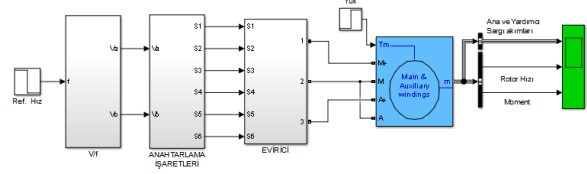


Şekil 15. V/f oranına bağlı olarak üretilen referans gerilimler

V/f oranından elde edilen frekans ile faz sargılarına uygulanacak referans 90° faz farklı gerilimler bir taşıyıcı dalga ile karşılaştırılarak üretilen anahtarlama işaretleri, sargıların bağlı olduğu evirici koluna; taşıyıcı dalganın yarım periyodunda iletimde, diğer yarım periyodunda kesimde olacak şekilde üretilen anahtarlama işareti ise, sargıların diğer uçlarının ortak bağlı olduğu diğer kola uygulanmıştır.

6. Benzetim Çalışmaları

Hız kontrol sistemi genel blok diyagramı Şekil 16’ da verilmiştir. V/f bloğu içerisinde referans bir hız değerine bağlı olarak sabit bir V/f oranı sağlanıp bu orana bağlı olarak genlik ve frekansı belirlenen birbirinden 90° faz farklı sinüzoidal işaretler oluşturulmaktadır. Buradaki değişim, anahtarlama elemanlarına uygulanacak anahtarlama işaretlerinin görev oranını değiştirmektedir. V/f oranına göre üretilmiş olan anahtarlama işaretleri evirici bloğu içerisindeki anahtarlama elemanlarına uygulanmıştır.



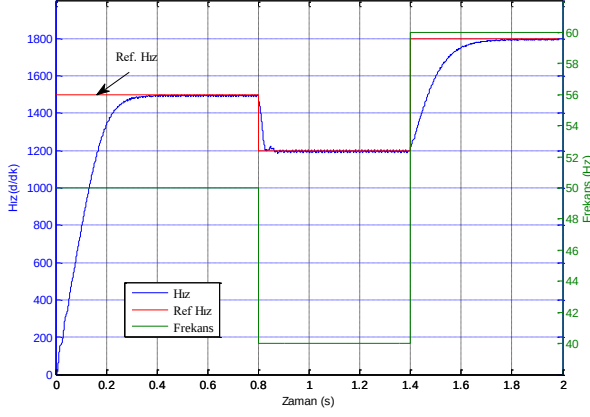
Şekil 16. V/f Hız kontrol sistemi Simulink Programı

V/f oranındaki değişim anahtarlama işaretlerinin görev oranını değiştirdiğinden buna bağlı olarak evirici çıkış gerilimi de değişmektedir.

Şekil 17’de değişik referans hız değerleri için motorun hızının değişimi verilmiştir. Burada $t=0$ anında 1500 d/dk olarak verilen referans hız değeri $t=0.5$ saniyede 1200 d/dk’ya düşürülmüş ve $t=1$ saniyede ise 1800 d/dk’ya yükseltilmiştir. Bu değişimlere karşılık olarak frekans da değişmiş ve aynı şekil üzerinde rotor hızı ile birlikte verilmiştir. V/f oranı değiştirilerek motorun hızının değiştiği görülmektedir. Benzetimde kullanılan motorun ana ve yardımcı sargılarına ilişkin parametreleri Tablo 1’de verilmiştir.

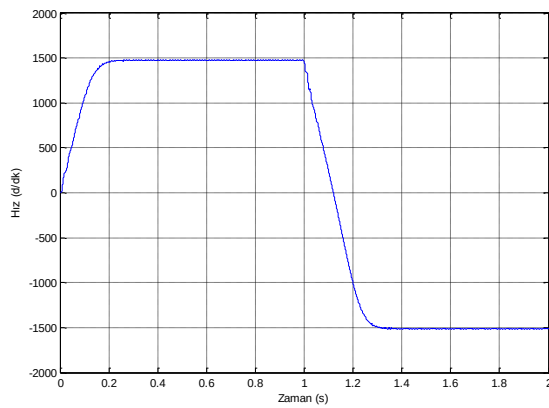
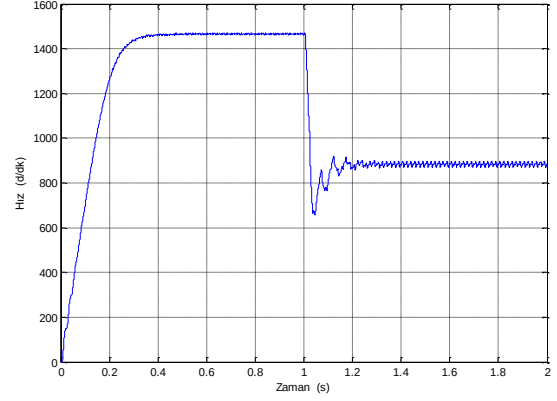
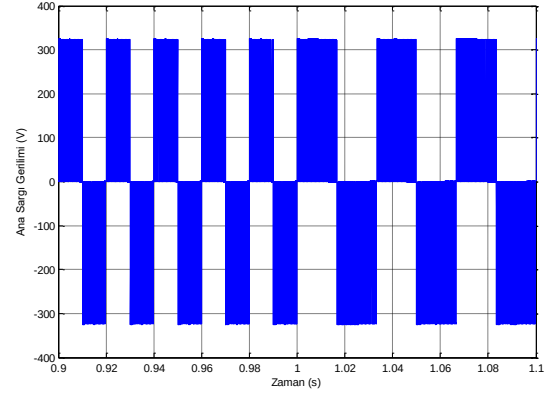
Tablo 1. Benzetimde kullanılan motor parametreleri

Ra (Ω)	La(mH)	Ry(Ω)	Ly(mH)	Lm(H)
2.02	7.4	7.14	8.5	0.17

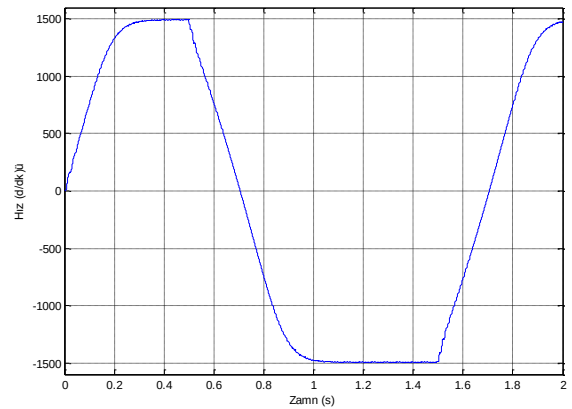
**Şekil 17.** Farklı referans hız değerleri için elde edilen hız ve karşılık gelen frekans değişimi

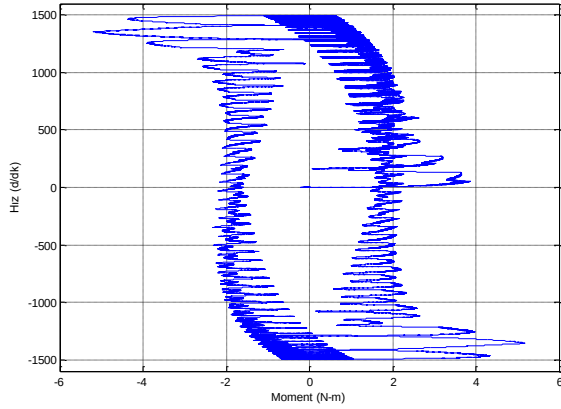
Şekil 18'de ise başlangıç anında 1500 d/dk olarak belirlenen Referans hız değeri $t=1$ saniyede -1500 d/dk olarak değiştirilmiş ve buna karşılık motor ters yönde belirlenen hız değeri ile dönmeye başlamıştır.

Şekil 19'de referans hızın 1500 d/dk'dan 900 d/dk'ya düşürülmesi ile elde edilen hız grafiği ve buna karşılık gelen evirici çıkış gerilimi ise Şekil 20'de büyütülerek verilmiştir. Burada $t=1$ anından önce ve sonraki işaretlerin frekanslarının farklı olduğu açıkça görülmektedir.

**Şekil 18.** Referans hızın $t=1$ s de 1500'den -1500 d/dk'ya düşürülmesi ile elde edilen hız cevabı**Şekil 19.** Referans hızın $t=1$ s de 1500'den 900 d/dk'ya düşürülmesi ile elde edilen hız cevabı**Şekil 20.** Ana sargıya uygulanan evirici çıkış gerilimi

V/f kontrollü sistemin dört bölge çalışmasını test etmek için hız referansı ± 1500 d/dk olarak değiştirilmiş ve elde edilen sonuçlar hız değişimi ile hız-moment değişimi Şekil 21 ile Şekil 22'de verilmiştir. Motorun dört bölgede çalışması bu şekillerden açıkça görülmektedir.

**Şekil 21.** Dört bölge çalışma



Şekil 22. Dört bölgeli çalışma hız-moment eğrisi

7. Sonuç

Endüstride ve evlerdeki birçok elektrikli cihazlarda sağlamlığı ve ucuzluğu nedeniyle bir fazlı asenkron motorlar kullanılmaktadır. Bu motorların kullanıldığı uygulamaların bazılarında değişken hız gerekmektedir.

Bu motorların ürettiği manyetik alanın değiştirilmeden hızının değiştirilmesinin en basit ve ucuz yöntemlerinden biri motora uygulanan gerilim/frekans oranının sabit tutulmasıyla sağlanmaktadır. Bu çalışmada motora uygulanan gerilim/frekans oranı (V/f) kontrol edilerek motorun hızının kontrol edilmesi gerçekleştirilmiştir.

Bu amaçla oluşturulan Simulink benzetim programı değişik V/f oranlarında çalıştırılarak motorun hız değişimleri elde edilmiş ve sonuçlar verilmiştir. Benzetim sonuçlarından, V/f kontrollü bir fazlı asenkron motorun iyi bir performans gösterdiği görülmüştür.

8. Kaynaklar

1. Latt, A.Z., Win, N.N. (2009). Variable speed drive of single phase induction motor using frequency control method. IEEE International Conference on Education Technology and Computer, ICETC'09, 30-34.

2. Analysis of Energy Conservation Standards for Small Electric Motors. Building Technologies, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, U.S. Department of Energy, 2003.

3. Blaabjerg, F., Lugeanu, F., Skaug, K., Tonnes, M. (2004). Two-phase induction motor drives. IEEE Industry Applications Magazine, 10 (4): 24-32.

4. Correa, M.B.R., Jacobina, C.B., Silva, E.R.C., Lima A.M.N., (2004). Vector control strategies for single-phase induction motor drive systems. IEEE Tran.on Industrial Electronics, 51 (5): 1073-1080.

5. Jemli M., Azza H.B., Bousak M., Gossa M., (2009). Sensorless indirect stator field orientation speed control for single-phase induction motor drive. IEEE Tran. on Power Electronics, 24 (6): 1618-1627.

6. Jang, D.H., Won, J.S. (1994). Voltage, frequency, and phase difference angle control of PWM inverter-fed two-phase induction motors. IEEE Trans. on Power Electronics, 9: 377-383.

7. Rocha, R., L. de Siqueira Martins, and J. C. D. de Melo (2005). A speed control for variable-speed single-phase induction motor drives. Industrial Electronics, ISIE 2005. Proceedings of the IEEE International Symposium, 43-48.

8. Kohlrusz, G., Fodor, D. (2011). Comparison of scalar and vector control strategies of induction motors. Hungarian Journal of Industry and Chemistry, 39 (2): 265-270.

9. Gajare, A.M., Bhasme, N.R. (2012). A Review on Speed Control Techniques of Single Phase Induction Motor International Journal of Computer Technology and Electronics Engineering (IJCTEE) 2 (5): 33-39.

10. Sampathkumar, A. (2013). Speed control of single phase induction motor using V/f technique. Middle-East Journal of Scientific Research, 16 (12): 1807-1812.

11. Veinott, C.G. (1959). Theory and Design of Small Induction Motors. Mc. Graww Hill.

12. The Induction Machine Handbook. CRC Press LLC, ch 23, 2002.

13. Julian, A., Wallace, R., Sood, P. (1995). Multi-speed control of single-phase induction motors for blower applications. IEEE Trans. on Power Electronics, 10: 72-77.

Farklı Katkılar İçeren Bitümlü Sıcak Karışımların Yorulma Ömürlerinin İncelenmesi

Mehmet YILMAZ, Baha Vural KÖK, Erkut YALÇIN

Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü ELAZIĞ
mehmetyilmaz@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 16.04.2017; Kabul/Accepted: 27.08.2017)

Özet

Bu çalışmada, bitüm modifikasyonunda stiren-butadiyen-stiren (SBS), Amerika Gilsoniti (AG) ve İran Gilsoniti (IG) kullanılmıştır. Uygulama bölgesi olarak Elazığ seçilmiş ve Elazığ'a uygun bağlayıcı elde edebilmek için %4 SBS, %11 AG ve %10 IG kullanılması gerektiği belirlenmiştir. Saf bitüm ve 3 farklı modifiye bitüm kullanılarak bitümlü sıcak karışım (BSK) numuneleri hazırlanmış ve tasarım bitüm içerikleri belirlenmiştir. Çalışmada ayrıca filler olarak %2 oranında hidrate kireç kullanılmıştır. Tasarım bitüm içeriklerinde hazırlanan bitümlü sıcak karışım numuneleri üzerinde 25°C sıcaklıkta ve 375 kPa gerilme seviyesinde indirekt çekme yorulma deneyi (İÇYD) uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlardan bitüm modifikasyonunda SBS, AG ve IG kullanımının karışımların yorulma ömrünü arttırdığı belirlenmiştir. En yüksek yorulma ömrü değerlerine %11 AG modifiyeli bitümlerle hazırlanan karışımların sahip olduğu belirlenmiştir. Çatlak ilerleme oranı değerleri incelendiğinde bitüm katkı maddelerinin karışımların çatlak ilerleyişine karşı dayanımlarını arttırdığı belirlenmiştir. Gilsonit kullanımının SBS'e göre çatlak ilerleyişine karşı dayanımı daha fazla arttırdığı tespit edilmiştir. Kireç kullanımının bitüm katkı kullanımı kadar etkin olmadığı belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Bitüm, Bitümlü sıcak karışım, Yorulma, Stiren-butadiyen-stiren, Amerika Gilsoniti, İran Gilsoniti.

Investigation of Fatigue Lives of Hot Mix Asphalts Including Various Additives

Abstract

In this study, styrene-butadiene-styrene (SBS), America Gilsonite (AG) and Iranian Gilsonite were used in bitumen modification. Elazığ province was chosen as the application region and 4% SBS, 11% AG and 10% IG were used in order to obtain the appropriate binder grade for Elazığ. Hot mix asphalts (HMAs) were prepared with neat and modified binders which include 3 different modifiers and designed bitumen contents were determined for each binder. Also, hydrated lime was used as filler in proportion of 2% with respect to aggregate weight. Indirect tensile fatigue tests (ITFT) were conducted on mixtures, which were prepared with design bitumen contents, under 375 kPa stress level and at 25°C. From the obtained results, it was determined that SBS, AG and IG usage in bitumen modification increased the fatigue life of mixtures. The highest fatigue life results were obtained from mixtures prepared with 11% AG modified binders. All bitumen modifiers increased the resistance to crack propagation of the mixtures. It was determined that Gilsonite usage in bitumen modification was more effective than SBS usage in terms of resistance to crack propagation of mixtures. It was observed that the hydrated lime was not as effective as the binder additives.

Keywords: Bitumen, Hot mix asphalt, Fatigue, Styrene-butadiene-styrene, America Gilsonite, Iranian Gilsonite.

1. Giriş

Artanağır taşıt trafiği ve dingil yükleri, esnek üstyapılarda kullanılan bitümlü sıcak karışımların performansının azalmasına neden olmaktadır. Taşıt yükleri ve trafik artışına bağlı olarak bitümlü sıcak karışımlarda (BSK) oluşan başlıca bozulmalardan biri yorulma çatlağı oluşumudur. Karayollarında kullanılan bitümlü malzemeler,

her bir taşıt geçişinde kısa süreli bir yüke maruz kalmakta ve bu yükler, malzemenin rijitliğinin azalmasına neden olan mikro hasarlara yol açmaktadır. Bu mikro hasarlar uzun dönemde yorulma çatlağı olarak adlandırılan kaplama bozulmalarına neden olmaktadır [1]. Yorulma çatlakları, tekrar eden yükler sonucu çatlak oluşumunu takiben kademeli olarak artmaktadır. Pratikte yorulmadan kaynaklanan bozulma

kaplamanın belirli bir oranda yorulma çatlakları ile kaplanması şeklinde tanımlanmaktadır.

Malzeme açısından; bitümlü sıcak karışım (BSK) tasarımının uygun şekilde yapılması, reolojik açıdan daha uygun bitümlü bağlayıcı seçimi, bozulmalara karşı daha dayanıklı bağlayıcı ve agrega seçimi üstyapı performansının artmasına yardımcı olmaktadır [2]. Agregalar, bitümlü sıcak karışımların ağırlıkça %90-95'ini oluşturmaktadır. Bitümlü sıcak karışımlarda agregalara göre çok az miktarda kullanılmalarına rağmen, bitümlü sıcak karışımların performansı üzerinde bitümlü bağlayıcıların büyük rolü bulunmaktadır. Bu nedenle bitümlü bağlayıcıların reolojik özelliklerini iyileştirmeye yönelik çok çeşitli çalışmalar yapılmaktadır [1].

Bitümlü sıcak karışımların çevresel etkenlere karşı yeteri kadar durabil ve trafik yüklerine karşı yeteri kadar stabil olması için bitümlü bağlayıcılara katkı maddeleri ilave edilmektedir [1]. Bitüm modifikasyonunda kullanılan katkı maddeleri genellikle polimerlerdir. Polimerler kendi aralarında; elastomerler ve plastomerler olmak üzere iki büyük gruba ayrılmakta olup bitüm modifikasyonunda en çok kullanılan malzeme olan stiren-butadiyen-stiren (SBS), elastomer polimer grubunda yer almaktadır [3]. SBS kopolimerleri, dayanımlarını ve elastikiyetlerini, moleküller arasındaki üç boyutlu ağlar ve çapraz bağlardan almaktadır. Polistiren uç bloklar polimerlerin mukavemetini sağlarken polibutadiyen bloklar elastikiyeti sağlamaktadır [4]. SBS bitüm ile karıştırıldığında SBS'nin elastomerik fazı bitümün yağı fraksiyonlarını absorbe etmekte ve ilk hacmine göre 9 kata yakın hacmi artmaktadır [5]. Yeterli miktarda SBS kullanılması ile sürekli polimer faz oluşmakta ve saf bitümün özellikleri iyileştirilmiş olmaktadır [6]. Yapılan çeşitli çalışmalarda bitüm modifikasyonunda SBS kullanımının bitümlü bağlayıcının reolojik özelliklerini iyileştirdiği, ayrıca bitümlü sıcak karışımların performansını olumlu yönde etkilediği belirlenmiştir [7-10].

Bitümlü sıcak karışımların performansını artırmak amacıyla kullanılan diğer bir grupta bitüm katkısı ise doğal hidrokarbonlardır [11]. Doğal olarak oluşan bitüm kaynağı olan ve genellikle gilsonit olarak isimlendirilen bitüm katkı maddeleri %99 saflıkta olup %57-70 oranında asfaltten içermektedir [12]. Mineral

bitüm olan gilsonit, siyah, kırılğan ve kolayca toz haline gelen bir yapıya sahiptir [13]. Başlıca Gilsonit kaynakları Amerika ve İran'da bulunmaktadır. Katkı olarak gilsonit kullanılması ile bitümlü bağlayıcının viskozitesi artarken Penetrasyon değeri azalmaktadır. Bu durum gilsonit kullanımının bitümün kıvamını arttırdığını göstermektedir. Gilsonit bitümlü sıcak karışımlarda genellikle iki şekilde kullanılmaktadır. İlk yöntemde gilsonit bitüm modifikasyonunda kullanılırken ikinci yöntemde karışıma ilave edilmektedir [14]. Bitüm modifikasyonunda Amerika Gilsoniti (AG) kullanılan bir çalışma sonucunda AG kullanımını ile BSK'ların yüksek sıcaklık dayanımı iyileşirken düşük sıcaklık dayanımı olumsuz yönde etkilendiği belirlenmiştir [15]. Bunun yanı sıra İran Gilsoniti (IG) kullanımı ile BSK'ların yüksek sıcaklık özelliklerinin yanında orta ve düşük sıcaklık özelliklerinin de iyileştiğinin belirlendiği çalışmalar bulunmaktadır [13, 16]. Bu durum kullanılan gilsonitin kaynağının ve saf bitümün özelliklerinin modifiye bitümün özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir.

BSK'ların dayanımını arttırmak amacıyla uygulanan diğer bir yöntem karışımın modifiye edilmesidir. Bu yöntemde, katkı malzemeleri doğrudan karışıma eklenmektedir. Karışıma eklenen katkı maddeleri genellikle filler malzemesi olarak kullanılmaktadır. Kireç, siyah karbon, uçucu kül gibi malzemeler BSK'larda filler olarak kullanılabilen katkı maddeleridir [1]. Mineral filler yerine belirli oranda kireç kullanılması, BSK'ların nem hasarına karşı dayanımını önemli miktarda arttırmaktadır [17]. Ayrıca, hidrate kireç, bitümlü sıcak karışımlardaki mastik yapıyı yüksek sıcaklıklarda mineral fillere göre daha sert hale getirmekte, böylece BSK'ların mekanik özellikleri iyileşmektedir [18]. Yapılan çeşitli çalışmalarda en etkin kireç oranının agrega ağırlığının %2'si olduğu belirlenmiştir [19].

Bu çalışmada bitüm modifikasyonunda SBS, AG ve IG kullanılarak modifiye bitümler hazırlanmıştır. Ayrıca filler olarak %2 oranında hidrate kireç kullanılmıştır. Hazırlanan modifiye bitümlerle tasarım bitüm içeriklerinde BSK numuneleri üretilmiştir. BSK numuneleri üzerinde indirekt çekme yorulma deneyleri uygulanmıştır. Böylece bitüm modifikasyonunda

üç farklı katkı türü ve filler olarak hidrate kireç kullanımının BSK'ların yorulma ömrüne etkisi değerlendirilmiş, ayrıca yorulma ömrü açısından en etkin katkı türü belirlenmeye çalışılmıştır.

2. Materyal ve Metot

Çalışmada, uygulama bölgesi olarak Elazığ seçilmiştir. Superpave yöntemine göre Elazığ'a ait 20 yıllık hava sıcaklığı verileri ve coğrafi bilgiler kullanılarak uygun bağlayıcı seviyesinin PG 70-22 olduğu belirlenmiştir. TÜPRAŞ rafinerisinden temin edilen PG 52-28 sınıfı saf bağlayıcı ana bağlayıcı olarak kullanılmıştır. Bu saf bağlayıcı ile SBS, AG ve IG kullanılarak modifiye bitümler hazırlanmıştır. SBS polimeri (Kraton D-1101); Shell Chemicals Company, AG; American Gilsonite Company ve IG Aydın Trade Company şirketlerinden temin edilmiştir.

Çalışmada, Elazığ için uygun bağlayıcı elde edilmesi için %4 SBS (MB_{%4.0SBS}), %10 IG (MB_{%10.0IG}) ve %11 AG (MB_{%11.0AG}) kullanılması gerektiği belirlenmiştir. Bağlayıcı deney sonuçları Tablo 1'de verilmiştir [20]. Modifiye bitüm hazırlanmasında bütün katkılar için aynı

prosedür uygulanmış olup, saf bitüm ile katkı maddeleri 180°C sıcaklıkta 60 dakika süresince 1000 devir/dakika hızla karıştırılmışlardır.

BSK hazırlanmasında Elazığ Karayolu Bölgesi'nden elde edilen kalker türü kırmataş agregası kullanılmıştır. Agregası fiziksel özellikleri Tablo 2'de verilmiştir. Çalışmada maksimum dane boyutu 19 mm olan yoğun gradasyonlu agregası kullanılmıştır. Kullanılan agregaya ait gradasyon eğrisi ise Şekil 1'de verilmiştir. Hidrate kireç içeren karışımlarda %2 oranında kalker filler yerine hidrate kireç kullanılmıştır.

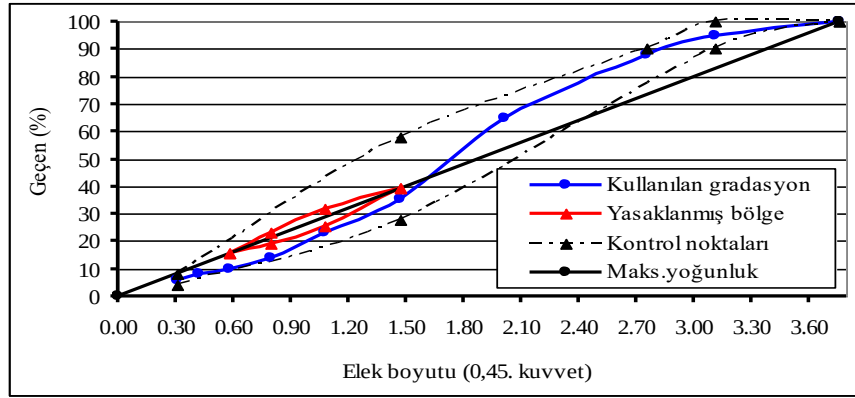
Amerika Stratejik Karayolu Araştırma Programı (SHRP), yolların performans ve durabilitesini arttırmak ayrıca yolları daha güvenli hale getirmek amacıyla yaptığı uzun süreli ve yüksek bütçeli araştırmalar sonucunda Yüksek Performanslı Asfalt Kaplama (Superpave) sistemini geliştirmiştir. Superpave sistemi; tekerlek izini, düşük sıcaklık ve yorulma çatlaklarını sınırlandırarak, uygulama bölgesindeki çevre koşullarını dikkate alarak kaplama performansını arttırmak amacıyla, kullanılacak malzemelerin performansına dayalı olarak incelenmesini içermektedir.

Tablo 1. DSR ve BBR deney sonuçları ve bağlayıcıların performans seviyeleri [20]

DSR deney sonuçları				
Sıcaklık (°C)	G*/sinδ (kPa) (şartname limiti min. 1 kPa)			
	PG 52-28	MB _{%4.0SBS}	MB _{%11.0AG}	MB _{%10.0IG}
52	1.803	-	-	-
70	-	1.279	1.334	1.291
G*/sin δ (kPa) RTFOT kalıntısı (şartname limiti min. 2.2 kPa)				
52	14.460	-	-	-
70	-	7.318	8.163	8.769
G*.sin δ (kPa) PAV kalıntısı (şartname limiti maks. 5000 kPa)				
16	2578	-	-	-
28	-	1158	1754	1746
BBR deney sonuçları				
Sıcaklık (°C)	m-değeri (şartname limiti min. 0.300)			
	PG 52-28	MB _{%4.0SBS}	MB _{%11.0AG}	MB _{%10.0IG}
-12	-	0.310	0.310	0.305
-18	0.514	0.278	0.405	0.723
-24	0.587	0.258	0.250	0.531
Sünme sertliği (Mpa) (şartname limiti maks. 300 MPa)				
-12	-	80.4	134.0	86.0
-18	182.6	125.1	389.9	359.3
-24	364.3	228.6	433.7	599.0
Performans seviyesi (PG)				
	52-28	70-22	70-22	70-22

Tablo 2. Kullanılan agregaların fiziksel özellikleri

Özellikler	Deney standardı	Mineral agreg			Şartname limiti
		Kaba	İnce	Filler	
Los Angeles Aşınma kaybı, (%)	ASTM C-131	25.4	-	-	Maks. 35
Aşınma kaybı (Mikro deval), (%)	ASTM D 6928	13.3			Maks. 15
Na ₂ SO ₄ ile donma kaybı, (%)	ASTM C-88	4.9	-	-	Maks. 10
Kaba agreg köşeliliği, (%)	ASTM D-5821	98/96	-	-	Min. 95/90
Yassı ve uzun daneler, (%)	ASTM D-4791	3	-	-	Maks. 10
Metilen mavisi (gr/kg)	EN 933-9		1.0		Maks. 1.5

**Şekil 1.** Kullanılan agreg gradasyonu

Superpave'in üç ana bileşenini; bağlayıcı şartnamesi, karışım dizaynı ile analiz ve bilgisayar yazılım sistemleri oluşturmaktadır [11, 15]. Çalışmada, karışımların tasarım bitüm içerikleri Superpave yöntemine göre belirlenmiştir. Hidrate kireç içeren karışımlarda

tamamen kalker kullanılan karışımlar için belirlenen bitüm içerikleri kullanılmıştır. Karışımların hacimsel özellikleri ve şartname limitleri Tablo 3'te verilmiştir. Bütün karışımlar şartname limitlerini sağlamıştır.

Tablo 3. Saf ve modifiye bağlayıcılarla hazırlanan karışımların hacimsel özellikleri [20]

Hidrate kireç içermeyen karışımlar					
Karışım özellikleri	Şartname limitleri	Bağlayıcı türü			
		PG 52-28	MB%4.0SBS	MB%11.0AG	MB%10.0IG
Tasarım bitüm içeriği (%)	—	4.67	4.90	4.80	4.85
Hava boşluğu (Va, %)	4.0	3.98	4.08	4.04	3.97
Agregalar arası boşluk oranı (VMA, %)	min. 14.0	14.24	14.11	14.17	14.06
Bitümle dolu boşluk oranı (VFA, %)	65–75	72.01	71.07	71.52	71.79
Filler oranı (Dp)	0.8–1.6	1.30	1.34	1.32	1.33
%Gmm@Nini. = 8 (%)	maks. 89	85.23	84.94	85.38	85.45
%Gmm@Ndes. = 100 (%)	96	96.02	95.92	95.96	96.03
%Gmm@Nmax. = 160 (%)	maks. 98	97.81	96.84	97.63	97.67

Tablo 3. Saf ve modifiye bağlayıcılarla hazırlanan karışımların hacimsel özellikleri (Devamı) [20]

Karışım özellikleri	Şartname limitleri	Hidrate kireç içeren karışımlar			
		Bağlayıcı türü			
		PG 52-28	MB%4.0SBS	MB%11.0AG	MB%10.0IG
Tasarım bitüm içeriği (%)	–	4.67	4.90	4.80	4.85
Hava boşluğu (Va, %)	4.0	4.21	4.39	4.29	4.26
Agregalar arası boşluk oranı (VMA, %)	min. 14.0	14.74	14.76	14.69	14.92
Bitümle dolu boşluk oranı (VFA, %)	65–75	71.41	70.30	70.81	71.42
Filler oranı (Dp)	0.8–1.6	1.26	1.27	1.28	1.24
%Gmm@Nini. = 8 (%)	maks. 89	80.71	82.25	82.46	82.64
%Gmm@Ndes. = 100 (%)	96	95.79	95.61	95.71	95.74
%Gmm@Nmax. = 160 (%)	maks. 98	97.36	97.14	97.22	97.38

2.1. İndirekt çekme yorulma deneyi

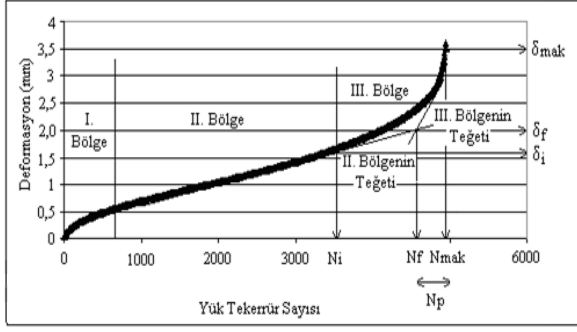
Bitümlü sıcak karışımların yorulma ömrünü değerlendirebilmek için çeşitli yöntemler bulunmakta olup bu yöntemlerde çok değişik numune geometrileri kullanılmaktadır. İndirekt çekme yorulma deneyinin basit olması ayrıca geometrisi nedeniyle numunelerin laboratuvar ortamı ya da araziden rahatlıkla temin edilebilmesi, bu deney yöntemini en fazla uygulanan deneylerden biri haline gelmiştir. Silindirik şeklindeki deney numunelerine düşey çapsal düzlemde haversine biçiminde tekrarlı basınç yükleri uygulanmaktadır. Bu yükleme, uygulanan yük doğrultusuna dik, yatay çapsal doğrultuda nispeten üniform çekme gerilmeleri oluşturmaktadır. Oluşan çekme gerilmeleri, numunenin düşey doğrultuda numunenin orta kısmında yarıma meydana gelmesine neden olmaktadır.

Gerilme kontrollü indirekt çekme yorulma deneyi (İÇYD), UMATTA deney aleti kullanılarak yapılmaktadır. Şekil 2’de deney düzeneği görülmektedir. Deney sistemi; iklimlendirme kabini, yükleme çerçevesi, yazılım ve bilgisayardan oluşmaktadır. Standart deney sıcaklığı 25°C olmasına rağmen iklimlendirme kabini sayesinde deney farklı sıcaklıklarda yapılabilir. Deney öncesinde numuneler, en az 3 saat deney sıcaklığında bekletilmektedir. Numune yüksekliği, çapı, uygulanacak gerilme

yük periyodu ve yük artış süreleri gibi değerler önceden yazılıma girilmektedir. Numune, yükleme çerçevesine yerleştirilmekte, düşey deformasyonu okuyacak doğrusal değişken türevsel dönüştürücüler (LVDT) ayarlanmakta ve deneye başlanmaktadır. Deney, numuneler tam olarak kırılıncaya kadar devam etmektedir.

**Şekil 2.** İndirekt çekme yorulma deney düzeneği

Gerilme kontrollü olarak yapılan yorulma deneyi sonucunda Şekil 3’te temsili olarak görüldüğü gibi yük tekrerrür sayısı-deformasyon miktarı grafiği çizilebilmektedir. Yorulma ömrü, bazı araştırmacılar tarafından deformasyon - yük tekrerrür sayısı grafiğinde eğimin önemli oranda değiştiği nokta veya II. kısım ve III. kısımlara <çizilen teğetlerin kesim noktası olarak tanımlanmaktadır [21, 22].



Şekil 3. Temsili deformasyon - yük tekrür sayısı ilişkisi

Çatlak ilerleme oranı (r_f), yorulma ömrü değerinden maksimum yük tekrar sayısına kadar her 1 mm deformasyon oluşabilmesi için gerekli yük tekrar sayısının ifade etmektedir. Çatlak ilerleme oranı ile ilgili formül aşağıda verilmiştir [21]. Çatlak ilerleme oranı, çatlak ilerleme hızıyla ters orantılıdır. Çatlak ilerleme oranının büyük olması, çatlak ilerleyişinin daha yavaş olduğunu göstermektedir.

$$r_f = \frac{N_p}{\delta_{\max} - \delta_f} \quad (1)$$

Burada;

r_f : Çatlak ilerleme oranı (darbe sayısı/mm)

N_p : Çatlak ilerlemesi için gerekli yük tekrar sayısı

$\delta_{f \max}$: Maksimum yük tekrar sayısındaki toplam deformasyon (mm)

δ_f : Yorulma ömründeki (N_f) toplam deformasyonu (mm) ifade etmektedir.

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. İndirekt çekme yorulma deney sonuçları

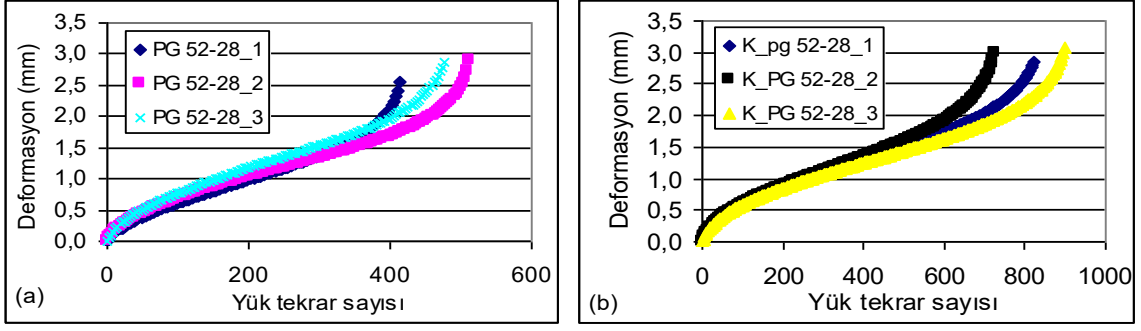
PG 52-28, MB_{%4.0SBS}, MB_{%11.0AG} ve MB_{%10.0IG} kullanılarak hazırlanan, filler olarak tamamen kalker ve %2 oranında hidrate kireç içeren karışım numuneleri üzerinde indirekt çekme yorulma deneyleri gerilme kontrollü olarak, 375 kPa gerilme seviyesinde ve 25°C sıcaklıkta uygulanmıştır. Deneyden önce numuneler 3 saat deney sıcaklığında bekletilmiştir. Bu süre sonunda numune, yükleme başlıkları arasına yerleştirilmiş, düşey deformasyonu okuyacak LVDT'ler ayarlanmış,

numune yüksekliği, çapı, gerilme seviyesi değerleri ve yükleme periyodu bilgisayara girilmiş ve deneye başlanmıştır. Yükleme periyodu 1.5 sn olarak alınmış bu sürenin 0.124 saniyesi yük etki süresi olarak ayarlanmıştır. Dolayısıyla dinlenme periyodu (rest period) 1.376 saniye olmuştur. Deney, numuneler tam olarak kırılıncaya kadar devam etmiştir. Numunelerin deneyden sonraki durumları Şekil 4'te görülmektedir.

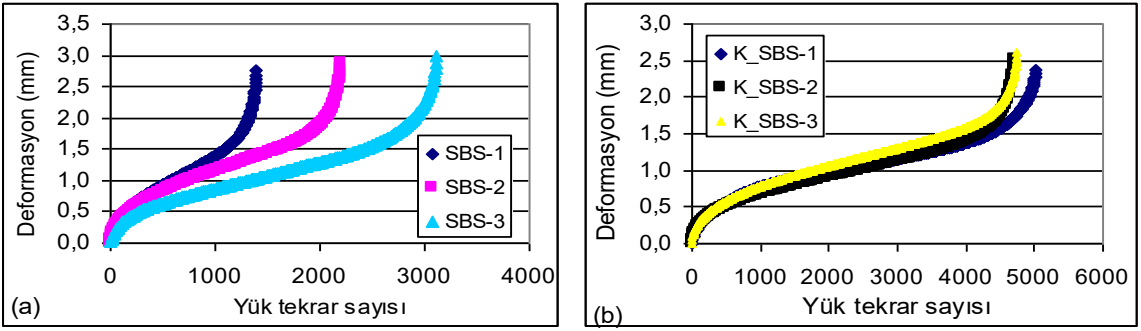


Şekil 4. İndirekt çekme yorulma deneyine tabi tutulan numuneler

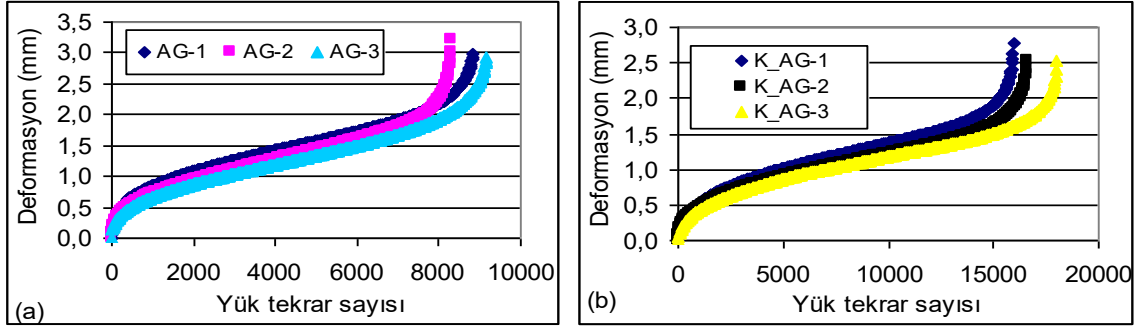
İndirekt çekme yorulma deneylerinde numunelerde kırılma meydana gelinceye kadar tekrarlı yük uygulanmaya devam edildiğinden maksimum yük tekrür sayısı ($N_{\max}$) ve maksimum yük tekrür sayısındaki deformasyon miktarları ($\delta_{\max}$) belirlenmiştir. Yük-deformasyon eğrisinde II. ve III. kısımların teğetlerinin kesişimlerinden yorulma ömürleri belirlenmiştir. III. kısımda teğet, eğrinin dönüş yaptığı noktadan itibaren alınmıştır. Excel ortamında eğrinin II. ve III. kısımları iki ayrı kısma ayrılmış belirlenen yerlerden geçirilen teğetlerin formülleri belirlenmiştir. İki teğet birbirine eşitlenerek karışımların yorulma ömürleri (N_f) belirlenmiştir. Formül 1 kullanılarak III. Bölgede, N_f ile $N_{\max}$ arasında her 1 mm deformasyon oluşabilmesi için gerekli yük tekrar sayıları (r_f) belirlenmiştir. PG 52-28, MB_{%4.0SBS}, MB_{%11.0AG} ve MB_{%10.0IG} bitümleri kullanılan numunelere 375 kPa gerilme seviyesinde uygulanan deneylerden elde edilen deformasyon-yük tekrür sayısı ilişkileri Şekil 5-8'de verilmiştir. Bütün karışımların deformasyon değerlerinin yük tekrarı ile değişimine birer örnek Şekil 9'da verilmiştir.



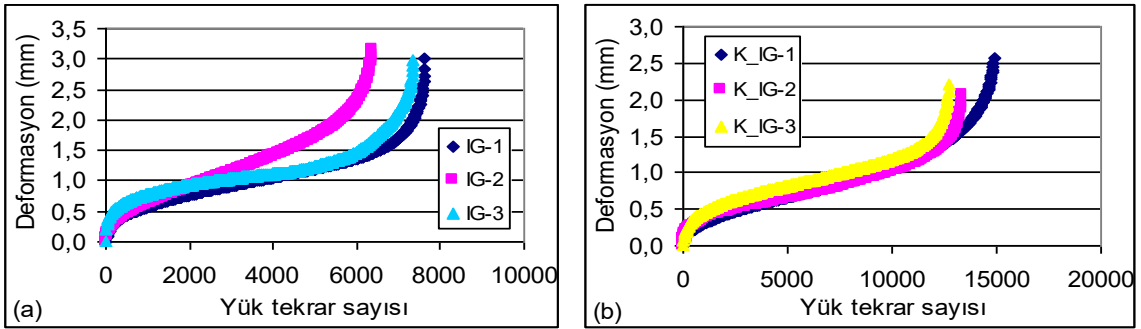
Şekil 5. PG 52-28 ile hazırlanan, kireç içermeyen (a) ve içeren (b) numunelerin deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi



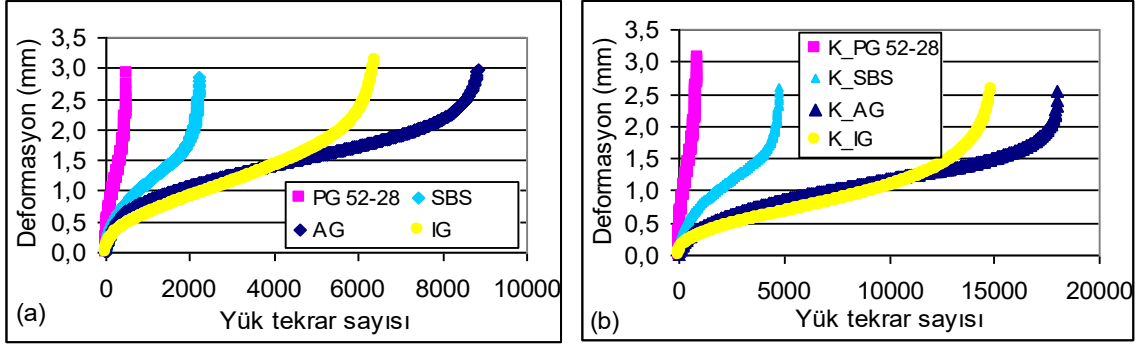
Şekil 6. MB%4,0SBS ile hazırlanan, kireç içermeyen (a) ve içeren (b) numunelerin deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi



Şekil 7. MB%11,0AG ile hazırlanan, kireç içermeyen (a) ve içeren (b) numunelerin deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi



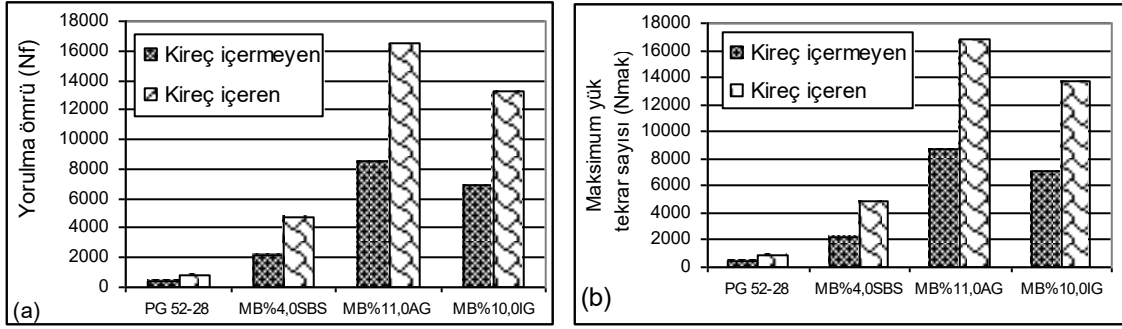
Şekil 8. MB%10,0IG ile hazırlanan, kireç içermeyen (a) ve içeren (b) numunelerin deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi



Şekil 9. Kireç içermeyen (a) ve içeren (b) karışımların deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisinin karşılaştırılması

Numunelerde kırılma meydana gelmesi için en düşük yük tekrar sayısına PG 52-28 ile hazırlanan karışımların, en yüksek yük tekrarına ise MB%11.0AG ile hazırlanan karışımların sahip olduğu belirlenmiştir (Şekil 9). Kireç kullanımı

ile yorulma ömürlerinin önemli oranda arttığı tespit edilmiştir. Ortalama yorulma ömrü (N_f) ve maksimum yük tekrar sayısı (N_{mak}) değerlerinin katkı türü ile değişimi Şekil 10'da verilmiştir.



Şekil 10. Yorulma ömrü (N_f) (a) ve maksimum yük tekrar sayısı (N_{mak}) (b) değerlerinin katkı kullanımı ile değişimi

Yorulma ömrü değerleri (Şekil 10a), yük tekrar sayısı - deformasyon grafiğinde II. ve III. kısımların teğetlerinin kesim noktalarından elde edilmiştir. Yorulma ömrü değerleri, hem filler olarak kireç kullanımı ile hem de bitüm katkı maddelerinin kullanımı ile artmıştır. Kireç kullanımı ile PG 52-28, MB%4.0SBS, MB%11.0AG ve MB%10.0IG ile hazırlanan BSK'ların yorulma ömrü değerleri sırasıyla 1.84; 2.21, 1.95 ve 1.92 kat artmıştır. Bu durum kireç kullanımının yorulma ömrü değerleri üzerinde en fazla MB%4.0SBS modifiyeli bitüm ile hazırlanan karışımlarda etkin olduğunu göstermiştir. Aynı zamanda kireç, en az PG 52-28 ile hazırlanan karışımlarda etkin olmuştur.

Kireç içermeyen karışımlarda MB%4.0SBS, MB%11.0AG ve MB%10.0IG ile hazırlanan karışımların yorulma ömrü değerleri PG 52-28 ile hazırlanan karışımlara göre sırasıyla 4.96, 19.77 ve 16.09 kat artmıştır. Kireç içeren karışımlarda

ise MB%4.0SBS, MB%11.0AG ve MB%10.0IG ile hazırlanan karışımların yorulma ömrü değerleri PG 52-28 ile hazırlanan karışımlara göre sırasıyla 5.96, 20.88 ve 16.80 kat artmıştır. Bu durum hem kireç içeren hem de kireç içermeyen karışımlarda yorulma ömrünün en fazla MB%11.0AG ile hazırlanan karışımlarda olacağını göstermektedir. Kireç içeren karışımlarda modifiye bitümlerle hazırlanan karışımların yorulma ömür değerlerinin saf karışıma göre artış oranlarının, kireç içermeyen karışımların artış oranlarına göre yükseldiği belirlenmiştir (MB%4.0SBS ile hazırlanan karışımlarda 4.96 kattan 5.96 kata arttığı gibi). Bu duruma bitüm katkı maddeleri ile filler olarak kireç kullanımının uyum göstermesinin neden olduğu düşünülmektedir. Bu sonuç, bitüm katkı maddelerinin karışımda filler olarak kireç kullanımı ile uyum sağlayacağını ve karışımların yorulma ömürlerini arttıracakını göstermektedir. Bunun yanında bitüm katkı

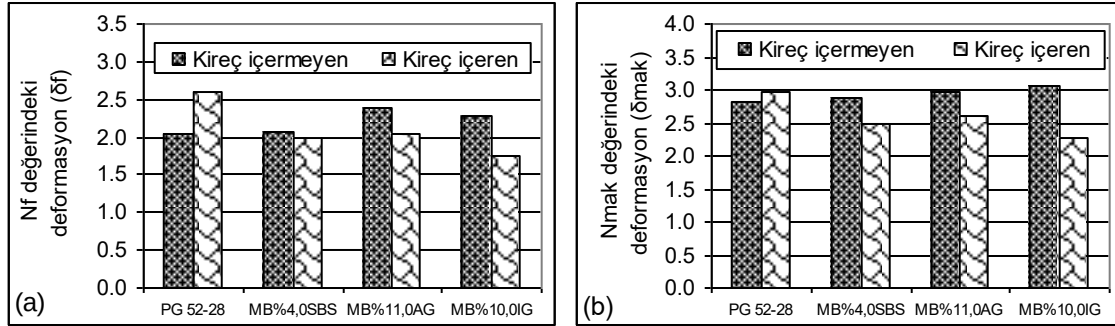
maddelerinin hepsinin yorulma ömrü bakımından filler olarak kireç kullanımına göre daha etkin olduğunu göstermektedir.

Karışımların maksimum yük tekrar sayıları (Şekil 10b), yorulma ömürleri ile benzer değişim göstermiştir. Hem filler olarak kireç kullanımı hem de bitüm modifikasyonunda SBS, AG ve IG kullanımı ile maksimum yük tekrar sayıları artmıştır. Kireç kullanımı ile PG 52-28, MB_{%4.0SBS}, MB_{%11.0AG} ve MB_{%10.0IG} ile hazırlanan karışımların N_{mak} değerleri sırasıyla 1.74, 2.16, 1.93 ve 1.92 kat artmıştır. Yorulma ömrü değerlerinde olduğu gibi maksimum yük tekrar sayısı değerlerinde de kireç kullanımı en fazla MB_{%4.0SBS} modifiyeli bitüm ile hazırlanan

karışımlarda, en az PG 52-28 ile hazırlanan karışımlarda etkin olduğu tespit edilmiştir.

Yorulma ömrü değerlerinde olduğu gibi hem kireç içeren hem de kireç içermeyen karışımlarda maksimum yük tekrar sayısına en fazla MB_{%11.0AG} ile hazırlanan karışımların sahip olduğu belirlenmiştir. Kireç kullanımı ile modifiye bitümlerin etkinlikleri artmıştır. N_{mak} değerleri açısından da bütün bitüm katkı maddelerinin filler olarak kireç kullanımına göre daha etkin olduğu belirlenmiştir.

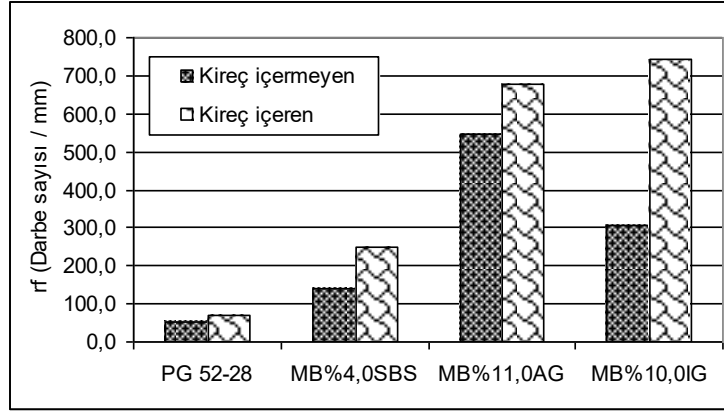
Yorulma ömrü (N_f) değerindeki deformasyon miktarlarının (δ_f) ve maksimum yük tekrar sayılarındaki deformasyon miktarlarının (δ_{mak}) ortalamasının katkı kullanımı ile değişimi Şekil 11'de verilmiştir.



Şekil 11. N_f (a) ve N_{mak} (b) değerlerindeki deformasyon değerlerinin katkı türü ile değişimi

N_f yük tekrar sayılarındaki deformasyon değerleri incelendiğinde PG 52-28 ile hazırlanan karışım dışındaki diğer karışımlarda filler olarak kireç kullanımı ile deformasyon değerlerinin azaldığı belirlenmiştir (Şekil 11a). Kireç içermeyen karışımlarda en yüksek δ_f değerine MB_{%11.0AG}, en düşük δ_f değerine ise PG 52-28 ile hazırlanan karışımın sahip olduğu belirlenmiştir. Kireç içeren karışımlarda ise en yüksek δ_f değerine PG 52-28 ile hazırlanan karışımın, en düşük değere ise MB_{%10.0IG} ile hazırlanan karışımın sahip olduğu tespit edilmiştir. Bu durum kirecin karışımındaki bağlayıcının cinsine göre deformasyon değeri üzerinde farklı etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Maksimum yük tekrarı sayılarındaki deformasyon değerleri (δ_{mak}) incelendiğinde δ_f değerleri ile uyum sağlandığı belirlenmiştir. Sadece kireç içermeyen karışımlarda maksimum deformasyon değerlerine MB_{%11.0AG} ile hazırlanan karışımların yanında MB_{%10.0IG} ile hazırlanan karışımların sahip olduğu tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlardan kireç içermeyen karışımlarda en gevrek davranışı PG

52-28 ile hazırlanan saf karışımın göstereceği, kireç içeren karışımlarda ise MB_{%10.0IG} ile hazırlanan karışımların göstereceği tespit edilmiştir. Karışımların $N_f - N_{mak}$ arası çatlak ilerleme oranı değerlerinin (r_f) katkı kullanımı ile değişimi Şekil 12'te verilmiştir. Şekil 12'de görülen $N_f - N_{mak}$ arası çatlak ilerleme oranı (r_f) değerlerinin katkı kullanımı ile değişimi incelendiğinde katkı kullanımı ile r_f değerlerinin arttığı belirlenmiştir. Kireç kullanımı ile çatlak ilerleme oranı değerleri sırasıyla 1.33, 1.78, 1.24 ve 2.41 kat arttığı tespit edilmiştir. Bu durum çatlak ilerleme oranı açısından kirecin en fazla MB_{%10.0IG} ile uyum sağladığını göstermektedir. Kireç içermeyen karışımlarda MB_{%4.0SBS}, MB_{%11.0AG} ve MB_{%10.0IG} ile hazırlanan karışımların çatlak ilerleme oranı değerlerinin PG 52-28 ile hazırlanan karışımlara göre sırasıyla 2.70, 10.66 ve 5.99 kat daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Kireç içeren karışımlarda ise sırasıyla 3.61, 9.89 ve 10.83 kat daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 12. Karışımların $N_f - N_{mak}$ arası çatlak ilerleme oranları

Elde edilen sonuçlar, bitüm katkı maddelerinin filler olarak kireç kullanımına göre daha etkin olduğunu göstermektedir. Ayrıca doğal asfaltların SBS'e göre daha etkin olduğu tespit edilmiştir.

4. Sonuçlar

İndirekt çekme yorulma deney sonuçlarından filler olarak kireç kullanımının ve bitüm modifikasyonunda SBS, AG ve IG kullanımının yorulma ömrünü arttırdığı belirlenmiştir. Ayrıca filler olarak kireç kullanımının ve bitüm modifikasyonunda SBS, AG ve IG kullanımının yorulma ömrünü daha da arttırdığı, katkıların birbiri ile uyum sağladığı tespit edilmiştir. Bitüm katkı maddelerinin hidrate kirece göre daha etkin olduğu tespit edilmiştir. Yorulma ömrü açısından kireç kullanımının en fazla SBS modifiyeli bitümlerle hazırlanan karışımlar üzerinde etkili olduğu belirlenmiştir. En yüksek yorulma ömrü değerlerine hem kireç kullanılan hem de kireç kullanılmayan numunelerde MB%11,0AG ile hazırlanan karışımların sahip olduğu tespit edilmiştir. Deformasyon değerleri dikkate alındığında PG 52-28 ile hazırlanan karışım dışında diğer karışımlarda kireç kullanımı ile deformasyon değerlerinin azaldığı belirlenmiştir. Çatlak ilerleme oranı değerleri incelendiğinde hem kirecin hem de bitüm katkı maddelerinin karışımların çatlak ilerleyişine karşı dayanımlarını arttırdığı belirlenmiştir. Doğal asfalt kullanımının SBS'ye göre çatlak ilerleyişine karşı dayanımı daha fazla arttırdığı tespit edilmiştir.

Hidrate kireç; mineral filler olarak görev yaparak bitümlü bağlayıcı ve karışımın rijitliğini

arttırmakta, düşük sıcaklıklarda çatlak oluşumuna karşı dayanımı arttırmakta, bitümlü bağlayıcı ve karışımın yaşlanmasını geciktirmekte ve karışımındaki killerin özelliklerini iyileştirerek nem hasarına karşı dayanımı ve durabiliteyi iyileştirmektedir [23]. Elde edilen sonuçlar literatürü destekler nitelikte olup bütün deney sonuçlarından yorulma ömrü açısından Amerika Gilsoniti'nin diğer bitüm katkılarına göre daha etkin olduğu, bitüm katkıları ile birlikte filler olarak hidrate kireç kullanılması ile yorulma ömrü açısından daha fazla fayda sağlanacağı söylenebilmektedir.

5. Teşekkür

MF.13.12 numaralı proje ile çalışmamızı destekleyen Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne (FÜBAP) teşekkürü bir borç biliriz.

6. Kaynaklar

1. Francken, L. (1998). Bituminous Binders and Mixes. Rilem Reports. 352 p.
2. Tang, N., Huang, W., Zheng, M., Hu, J. (2016). Investigation of Gilsonite-, polyphosphoric acid- and styrene-butadiene-styrene-modified asphalt binder using the multiple stress creep and recovery test. *Road Mater. Pavement*, DOI: 10.1080/14680629.2016.1206954.
3. Sengoz, B., Isikyakar, G. (2008). Analysis of styrene-butadiene-styrene polymer modified bitumen using fluorescent microscopy and conventional test methods. *J. Hazard. Mater.* **150**: 424–432.
4. Isacsson, U., Lu, X. (1995). Testing and appraisal of polymer modified road bitumens: State of the art. *Mater. Struct.* **28**: 139–159.

5. Şengöz, B., Işıkyakar, G. (2008). Evaluation of the properties and microstructure of SBS and EVA polymer modified bitumen. *Constr. Build. Mater.* **22** (9): 1897-1905.
6. Cavaliere, M.G., Diani, E., Dia, M.D. (1996). Dynamic mechanical characterization of binder and asphalt concrete. In: *Proceedings of Euroasphalt and Eurobitume Congress*, (7-10 May), Strasbourg.
7. Yılmaz, M., Çeloğlu, M.E. (2013). Effects of SBS and different natural asphalts on the properties of bituminous binders and mixtures. *Constr. Build. Mater.* **44**: 533-540.
8. Sonmez, I., Deniz, M.T., Tayfur, S., Ozen, H., Yildirim, S.A., Eren B.K. (2005). Effects of modifiers on the hot mix asphalt performance. 6th Transportation Congress, (23-25 May), Istanbul, 334-348.
9. Topal, A., Yılmaz, M., Kök, B.V., Kuloglu, N., Sengoz, B. (2011). Evaluation of rheological and image properties of styrene-butadiene-styrene and ethylene-vinyl acetate polymer modified bitumens. *J. Appl. Poly. Sci.* **122**: 3122-3132.
10. Gorkem, C., Sengoz, B. (2009). Predicting stripping and moisture induced damage of asphalt concrete prepared with polymer modified bitumen and hydrated lime. *Constr. Build. Mater.* **23**: 2227-2236.
11. Bahia, H.U., Hanson, D.I., Zeng, M., Zhai, H., Khatri, M.A., Anderson, R.M. (2001). Characterization of modified asphalt binders in superpave mix design (No. Project 9-10 FY'96), *NCHRP*, Washington.
12. Brown, S.F., Rowlett, R.D., Boucher, J.L. (1990). Asphalt modification. *Proceedings of the conference The United States strategic highway research program*. London: Institute of Civil Engineers, 181-203.
13. Ameri, M., Mansourian, A., Ashani, S.S., Yadollahi, G. (2011). Technical study on the Iranian Gilsonite as an additive for modification of asphalt binders used in pavement construction. *Constr. Build. Mater.* **25**: 1379-1387.
14. Bardesi, A., Brule, B., Corte, J. F., Diani, E., Gerritsen, A., Lefevre, G., Watkins, S. (1999). Use of modified bituminous binders, special bitumens and bitumens with additives in pavement applications. Technical Committee Flexible Roads (C8) World Road Association (PIARC), Paris, France.
15. Anderson, D.A., Maurer, D., Ramirez, T., Christensen, D.W., Marasteanu, M.O., Mehta, Y. (1999). Field performance of modified asphalt binders evaluated with superpave test methods: 1-80 test project. *Transp. Res. Rec.* **1661**: 60-68.
16. Aflaki, S., Tabatabaee, N. (2009). Proposals for modification of Iranian bitumen to meet the climatic requirements of Iran. *Constr. Build. Mater.* **23**: 2141-2150.
17. Little, D.N., Petersen, J.C. (2005). Unique effects of hydrated lime filler on the performance-related properties of asphalt cements: physical and chemical interactions revisited. *J. Mater. Civil Eng.* **17**: 207-218.
18. Moullet, V., Séjourné, D., Delmotte, V., Ritter, H.J., Lesueur, D. (2014). Method of quantification of hydrated lime in asphalt mixtures. *Constr. Build. Mater.* **68**: 348-354.
19. Kök, B.V., Yılmaz, M. (2009). The effects of using lime and styrene-butadiene-styrene on moisture sensitivity resistance of hot mix asphalt. *Constr. Build. Mater.* **23**: 1999-2006.
20. Yılmaz, M., Yalçın E. (2016). The effects of using different bitumen modifiers and hydrated lime together on the properties of hot mix asphalts. *Road Mater. Pavement*, **17**(2): 499-511.
21. Subagio, B.S., Siswosoebrotho, B.I., Karsaman, R.H. (2003). Development of laboratory performance of Indonesian Rock Asphalt (Asbuton) in hot rolled asphalt mix. *Proc. East. Asia Soc. Transportation Stud.*, **4**: 436-449.
22. Aragao, F.T.S., Lee J., Kim, Y.R., Karki, P. (2010). Material specific effects of hydrated lime on the properties and performance behaviour of asphalt mixtures and asphaltic pavements. *Constr. Build. Mater.* **24**(4): 538-544.
23. Little, D.N., Epps, J.A. (2001). The benefits of hydrated lime in hot mix asphalt. *National Lime Association*, p. 54.

Bir-Fazlı İndüksiyon Motorlar İçin Paralel Aktif Güç Filtresi Tabanlı Reaktif Güç Kompanzasyonu

Mehmet GEDİKPINAR^{*1}, Mustafa GÜNGÖR²

^{*1}Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Elazığ,

² Artuklu Üniversitesi Midyat MYO Elektrik ve Enerji Programı Midyat/MARDİN

mgedikpinar@gmail.com

(Geliş/Received: 17.04.2017; Kabul/Accepted: 14.07.2017)

Özet

Bu makalede, bir fazlı indüksiyon motorun bir fazlı paralel aktif güç filtresi kullanılarak güç katsayısının düzeltilmesi amaçlı bir benzetim çalışması verilmiştir. Benzetim sistemi bir fazlı indüksiyon motoru, histerezis bant akım kontrolör, gerilim kaynaklı paralel aktif güç filtresi, DC hat kapasitörü ve AC tarafında bir indüktörden oluşmaktadır. Paralel aktif güç filtresi, sinüs çarpım tekniğini kullanarak referans akımları üretmektedir. Yaygın olarak kullanılan bir fazlı indüksiyon motorlarının şebeke/kaynaktan reaktif güç talepleri olmakta, önerilen filtre ile bir fazlı indüksiyon motorun reaktif güç talebi karşılanmakta ve böylece güç katsayısı düzeltme işlemi başarılı bir şekilde gerçekleştirilmektedir. Ayrıca, önerilen filtrenin dinamik yük şartlarına cevabı oldukça iyi olduğu alınan sonuçlardan anlaşılmaktadır.

Anahtar kelimeler: Paralel aktif güç filtresi, Bir fazlı indüksiyon motoru, Güç katsayısı düzeltme.

Reactive Power Compensation for Single-Phase Induction Motor Based Parallel Active Power Filter

Abstract

This paper presents a simulation for a single-phase parallel active power filter aimed power factor correction of a single-phase induction motor. The simulation of system consists of a single-phase induction motor, hysteresis band current controller, voltage-source parallel active power filter with a dc-bus capacitor and a filter inductance at the AC output. The active power filter reference currents are generated by using the sinus product technique. There are reactive power demands from the grid of a phase induction motors that used commonly today. The proposed filter meets the reactive power requirement of a one-phase induction motor and thus the power coefficient correction process is performed successfully. Besides, the dynamic performance of the proposed filter is so good to response the dynamic load conditions.

Keywords: Parallel active power filter, Single phase induction motor, Power factor correction.

1. Giriş

Reaktif güç, şebekenin güç kalitesini olumsuz yönde etkileyen güç kalitesi problemlerinin en önemlilerinden birisidir. Bu problemten dolayı, reaktif gücün yüksek gerilim sistemlerinde ve ağır sanayi tesislerinde kompanze edilmesi gerilim kararlılığı sağlamak ve güç kalitesini arttırmak için önem arz etmektedir [1]. Bahsedilen bu problem giderilmediği takdirde; şebekenin güç katsayısında ($\cos \phi$) düşme, trafo ve iletim hattı ve kablolar gibi enerji dağıtım elemanlarında aşırı ısınma, sistem

koruma elemanlarının arıza olmadığı halde çalışıp sistemi enerjisiz bırakma, elektromanyetik cihazların (kontaktör) vb. titreşimli çalışma gibi istenmeyen durumlara yol açmaktadır [2, 3]. Reaktif güç kompanzasyonu için günümüze kadar ağırlıklı olarak kullanılagelen yöntem pasif devre elemanları ile yapılan filtrelerdir. Pasif devre elemanları ile yapılan filtrelerin şebeke empedansı ile anlık olarak yükte rezonansa girme riski vardır. Bu yüzden pasif filtre ile uygulanacak çözümlerde sistemden çekilen harmonik ve reaktif güç ile ilgili kesin bilgilere ihtiyaç duyulur. Pasif filtrelerin

yüksek güçlerdeki (MVA) uygulamalarına çok sık rastlanılmaktadır. Örneğin 100 MVA'lık bir sistemin güç faktörünün 0.85'ten 0.90'a yükseltilebilmesi için yaklaşık 10MVA'lık reaktif güce ihtiyaç vardır [4]. Böyle yüksek reaktif güçlere çıkıldığında filtrelerde kullanılan pasif elemanların ağırlıkları ve hacimleri çok büyük ölçülere ulaşabilmektedir [4-6]. Pasif filtrelerin bu olumsuz özelliklerine rağmen yapılarının basit, verimlerinin yüksek olması ve düşük yatırım maliyetleri bu yapıların kullanılmasındaki en önemli sebepleri sayılmaktadır. Pasif filtreler bu avantajlarına rağmen yukarıda belirtildiği gibi pek çok olumsuz yanlarından dolayı, gelişen güç anahtarları teknolojisi ile birlikte, yerlerini güç kalitesi problemlerine dinamik ve ayarlanabilir çözümler getiren aktif güç filtrelerine (AGF) bırakmaya başlamıştır [3, 6].

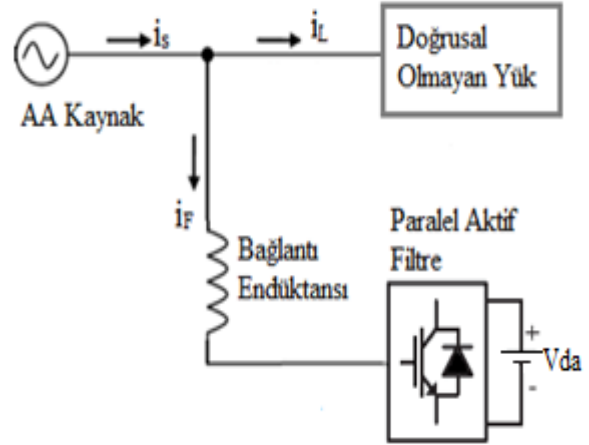
Pasif filtrelerin dezavantajlarını ortadan kaldırabilmek için geliştirilen ve aktif güç filtresi olarak bilinen çalışmalara ilk olarak 1970'li yıllarda rastlanmıştır [7]. Günümüzde seri, paralel, hibrit ve birleştirilmiş güç kalitesi düzenleyicisi gibi farklı aktif güç filtreleri, güç kalitesi problemlerinin büyük çoğunluğuna çözüm bulabilmek için denenmekte ve iyileştirme çalışmaları devam etmektedir [8]. Günümüze kadar yapılan çalışmalar sonunda, cevap hızları oldukça yüksek aktif güç filtreleri tasarlanabilmektedir. Yeni üretilmekte olan güç anahtarlarının çok yüksek frekanslarda anahtarlama yeteneklerinden dolayı, aktif güç filtrelerinin yüksek frekanslı akım ve gerilim harmoniklerini de filtreleyebilmesine, reaktif güç kompanzasyonu yapabilmesine, üç fazlı sistemlerde dengesizliğin giderilmesi ve nötr hattı akımlarının azaltılmasına olanak sağlamaktadır. Bu nedenle aktif güç filtreleri, harmonik ve reaktif güç kompanzasyonu için günümüzün en etkili yöntemlerinden sayılmaktadır [9, 10]. Aktif güç filtreleri tek fazlı veya üç fazlı devrelerde paralel veya seri olarak kullanılabilirler. Günümüzde büyük yüklerde üç fazlı ve küçük güçlü yüklerde ise tek fazlı filtre uygulamalı yapılmaktadır.

Bu çalışmada, tek-fazlı şebekeden beslenen bir indüksiyon motorunun güç katsayısı paralel aktif güç filtresi (PAGF) yardımıyla iyileştirilerek birim güç faktöründe çalışması sağlanmıştır.

2. Bir Fazlı Paralel Aktif Güç Filtresi

Önceki bölümde kullanım alanları verilen PAGF, bağlandığı sistemin ortak bağlantı noktasındaki yük akımını ölçer ve sisteme yük akımının harmonikli sinyalleri ile eşit genlikte fakat 180° zıt yönlü akım vererek sistemi zıt bir reaktif güç ile yükler [5]. Şekil 1'de bir fazlı gerilim beslemeli paralel aktif güç filtresinin bir fazlı indüksiyon/asenkron motora (ASM) bağlantısı verilmiştir.

Paralel aktif güç filtrelerinde güç devresinin kontrolü için gerekli olan anahtarlama darbeleri, yük akımının çektiği harmonikli akım ölçüm sonucu elde edilen sinyallerin kontrol sistemine göre analizi yapıldıktan sonra üretilir.



Şekil 1. Paralel aktif güç filtresinin bir fazlı ASM'ye bağlantısı

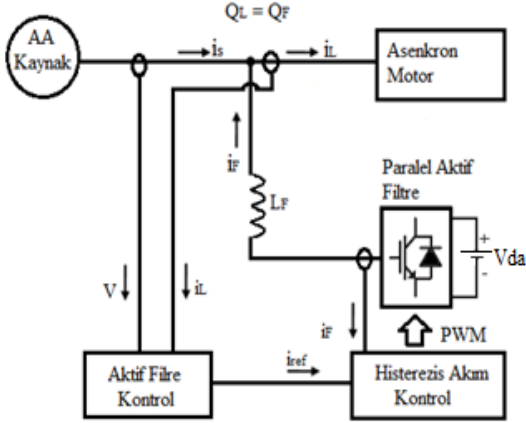
Literatürde, reaktif güç kompanzasyonu işlemlerinde, gerilim beslemeli paralel aktif güç filtrelerinin kullanımına çok sık rastlanmaktadır. Çünkü bu tip filtre yapıları ile reaktif güç kompanzasyonu, harmonikli akım filtreleme ve nötr hattı akımlarının azaltılması gibi işlemler başarılı bir şekilde yapılabilmektedir [11].

3. Modelleme

Bu çalışmada bir fazlı paralel aktif güç filtresinin referans akım çıkartımı için sinüs çarpım tekniği, akım kontrolü için ise histerezis akım kontrol yaklaşımından faydalanılmıştır. Güç

devresinde ise tam köprü inverter kullanılmıştır. Şekil 2’de bir fazlı PAGF’ lı bir fazlı ASM’nin reaktif güç kompanzasyonu için prensip devre şeması verilmiştir. Şekilde verilen PAGF bir bobin (L_F) üzerinden kaynağa bağlanmıştır. Doğru akım tarafında enerji ihtiyacı için bir DC kaynak kullanılmıştır. Devrede kullanılan bobin, filtre tarafından oluşturulan anahtarlama anında meydana gelen parazitleri engellemek amaçlıdır [5].

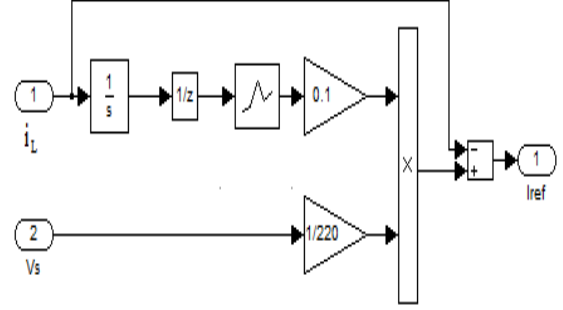
PAGF’ ın çalışma prensibi temel olarak; kaynak akımı ile gerilimi arasındaki açının sıfır olmasını sağlamak için ASM tarafından meydana getirilen reaktif güce zıt yönde ve eşit genlikte bileşenler üretmek şeklinde düşünülebilir. DC kaynak genliği ve L_F bobin değerleri sistemin verebileceği tepkiyi çok yakından etkileyeceği gerçeği ile değerlerinin seçilmesine dikkat edilmelidir [12].



Şekil 2. Bir fazlı PAGF’nin ASM’ye bağlantısı

3.1. Aktif filtre kontrol tekniği

Bu çalışmada referans akım bulmak için frekans bölgesinde sinüs çarpım tekniği kullanılmıştır (Bu teknik ile ilgili blok, şekil kirliliği oluşturmamak için sadece Şekil 3’de verilmiştir). Literatürde bu teknik, bir fazlı paralel aktif güç filtrelerinde referans kompanzasyon akımını belirlemek için sıkça kullanılmaktadır [13]. Bu referans bulma yönteminde anlık ölçülen i_L akımının integrali alınıp daha sonra oransal çevirici ile uygulanıştırma amaçlı olarak ona bölünmüştür.



Şekil 3. Referans akım belirleyici

Kaynak geriliminin ideal kabul edilerek anlık gerilim Eşitlik 1’deki gibi verilebilir.

$$V(t) = V_m \sin wt \quad (1)$$

ASM’ nin kaynaktan çektiği akımın anlık değeri ise Eşitlik 2 ile ifade edilebilir.

$$i_{L(t)} = \sum_{n=1}^{\infty} i_n \sin(n \cdot wt - \theta_n) \quad (2)$$

Kaynak geriliminden elde edilen birim sinüs sinyali Eşitlik 3’deki gibi yazılır.

$$u(t) = \sin(wt) \quad (3)$$

Kaynaktan çekilen akımın anlık değeri ise Eşitlik 4’deki gibi olur.

$$i_{s(t)} = \frac{1}{T} \int_0^T [i_{L1} \sin(wt + \theta_1) + \sum_{n=2}^{\infty} i_n \sin(nwt + \theta_n)] \sin(wt) dt$$

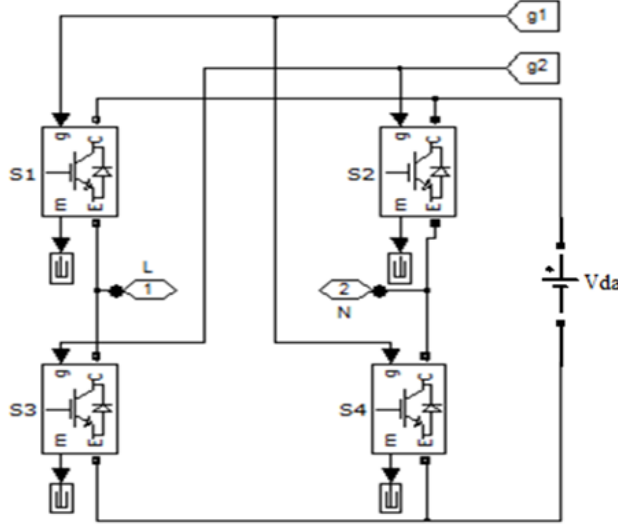
$$i_{s(t)} = i_{L1} \cdot \cos \theta_1 \quad (4)$$

Aşağıda verilen Eşitlik 5 ile 6 ile referans alınan kaynak ve filtre akımlarının anlık değerleri hesaplanabilir.

$$i_{L(t)} = \sqrt{2} i_{L1} \cdot \cos \theta_1 \cdot \sin(wt) \quad (5)$$

$$i_{F(t)} = i_{s(t)} - i_{L(t)} \quad (6)$$

Paralel Aktif Güç Filtresi: Şekil 4’de bir fazlı gerilim kaynaklı paralel aktif güç filtresi verilmiştir. Verilen bu aktif filtre yapısı genel olarak tam köprü tipi inverter ile gerilim kaynağından (V_{da}) oluşmaktadır [12].

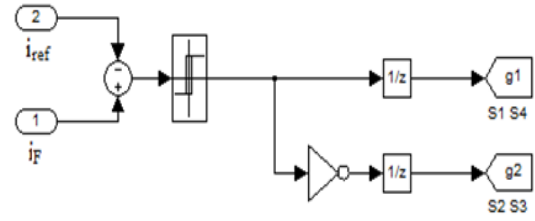


Şekil 4. Bir fazlı gerilim kaynaklı PAGF' in blok şeması

Gerilim kaynağı ve indüktans elemanının değerleri PAGF'nin vereceği tepkiyi etkilediğinden, seçilmesi sırasında dikkatli olunması unutulmamalıdır. Bu çalışmada devrenin analizi gerçekleştirilirken bipolar çalışma modu kullanılmıştır [14]. Aktif güç filtresi tam köprü tipi inverter ve enerji depolama elemanı olan kondansatörden meydana gelmektedir. İnverter dört adet yarı iletken anahtar ve diyot içerdiğinden akımı çeken doğrultucu olarak veya harmonik kompanzasyonu için akım sağlayan inverter olarak da çalıştırılabilir [15].

3.2. Histerezis bant akım kontrol tekniği

Histerezis bant akım kontrol tekniğinde, referans akım ile gerçek akım karşılaştırılır ve elde edilen akım hatasına göre inverter için kapı işaretleri üretilir. Üretilen hata değerine göre bir karşılaştırmacı yardımıyla akımın belirli değerler aralığında kalması sağlanır. Şekil 5’de histerezis akım denetleyicisinin blok şeması ve çalışma prensibi verilmiştir.



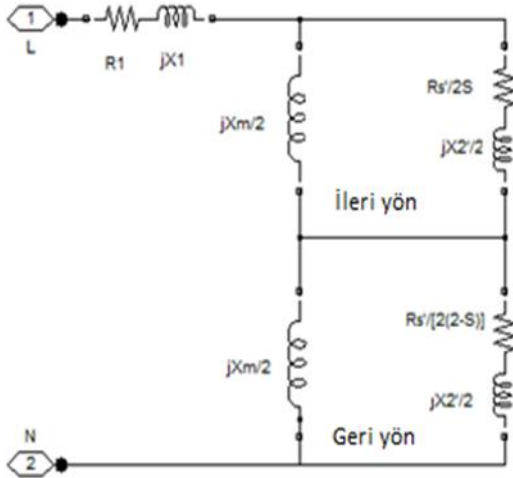
Şekil 5. Histerezis bant blok diyagramı

Akım hatasının değeri, belirlenen bant genişliği alt ve üst sınırları ile karşılaştırılır. Anahtarlar uygulanacak kapı işaretleri, bu karşılaştırma verilerinden yararlanarak üretilir [2]. Referans akımı i_{ref} ile inverter tarafından üretilen akım i_F arasındaki fark olan hata sinyali anahtarları kontrol etmekte kullanılır. Filtre akımı histerezis bantın üst sınırına ulaştığında S_2 çıkışı 1 olmakta ve devreye $+V_{da}$ gerilimini uygulanmaktadır (Şekil 4’de verildiği gibi). Filtre akımı histerezis bantın alt sınırına geldiğinde ise S_1 çıkışı 1 olmakta ve devreye $-V_{da}$ gerilimi bağlantı indüktansı üzerinden devreye uygulanmaktadır. Bu şekilde filtre akımı, histerezis bantın sınırlandırılmış bant aralığına (%1) bağlı olarak üretilen referans akımı takip etmektedir. Çalışılan kontrol yapısında kullanılan histerezis akım denetleyicinin en büyük dezavantajı anahtarlama frekansının sabit olmaması ve referans akıma göre sürekli değişim göstermesidir.

3.3. Bir fazlı ASM'nin eşdeğer devresi

Bir fazlı indüksiyon motorlar iki ana parçadan meydana gelmektedirler. Bunlar döner manyetik alanın oluştuğu kısım stator ve dönen kısım olarak bilinen rotordur. Stator, AC kaynaktan beslenen ana ve yardımcı sargı olarak adlandırılan iki sargıdan oluşur. Bir fazlı ASM'nin elektriksel eşdeğeri Şekil 6’ da verilmiştir. Verilen elektriksel eşdeğer devrede stator tarafının direnci R_1 , kaçak reaktansı X_1 ile temsil edilmektedir. İleri yön kolu stator genliğinin yarısı kadar bir genliğe sahip senkron hızda dönen ileri yönlü döner manyetik alanı ve geri yön kolu ise yine senkron hızda ama senkron hız ters yönde dönen ve ileri yön ile aynı genlikte olan manyetik alanı temsil etmektedir. İleri ve geri yön kolları rotor kısa devre çubuklarında akım

indüklenmesini sağlayarak indüksiyon olayını gerçekleştirirler. Bu kollar ile oluşturulan moment ileri ve geri yönde oluşur. Tam olarak döner momentin oluşmasını, ana sargıya göre özel form ve özellikteki yapısı ile yardımcı sargı sağlar. Yardımcı sargıya seri bağlı kondansatör/kondansatörler olaya yardımcı olur.

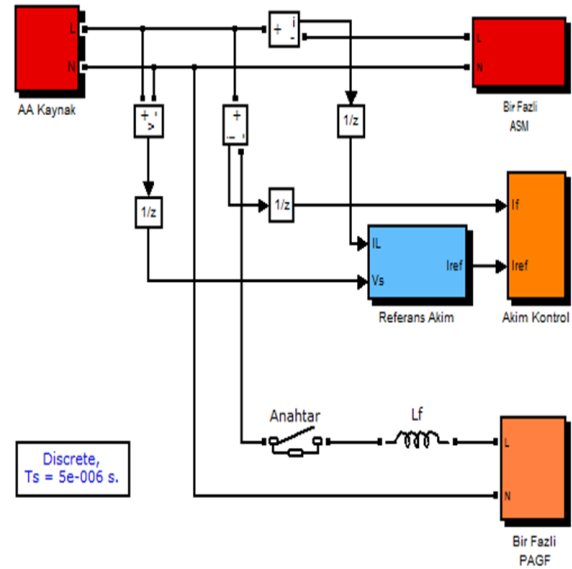


Şekil 6. Bir fazlı ASM'nin eşdeğer devresi

4. Benzetim Çalışması ve Sonuçları

Benzetim çalışmasında sonuçlar elde edilirken iki farklı kayma değerlerinde sonuçlar elde edilmiştir. İndüksiyon motordaki farklı kayma değerleri, rotor devrinin yüklerle birlikte değişmesi anlamına gelmektedir. Farklı kayma değerlerinde çalıştırmadaki amaç; bir fazlı indüksiyon motorun farklı yükler altındaki çalışmalarda reaktif güç kompanzasyonu işleminin uygulanabilirliğini gözlemleyebilmektir. Simülasyon çalışmasında kullanılan bir fazlı indüksiyon motorun ve paralel aktif filtresinin bazı önemli görülen temel parametre değerleri Tablo 1'de verilmiştir.

ASM dengeli 220V efektif değere sahip bir kaynak gerilimi ile beslenmektedir. Bu gerilim sinyalinin saf sinüzoidal olması önemlidir, çünkü referans akım üretmek için kullanılan birim sinüs sinyali kaynak geriliminden elde edilmektedir.

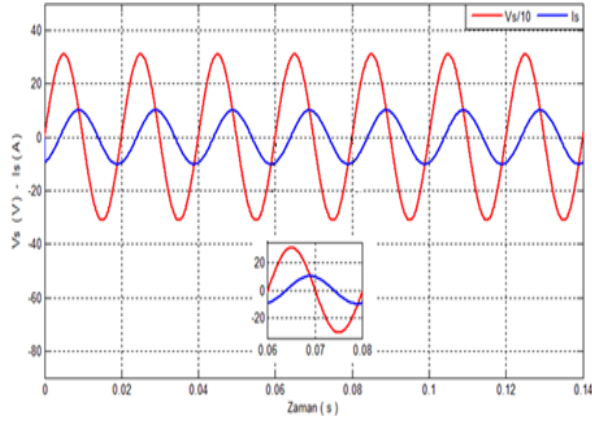


Şekil 7. Matlab/Simülink'te hazırlanan çalışmaya ait genel blok şeması

Tablo 1. ASM'nin elektriksel eşdeğer devresi benzetim parametreleri

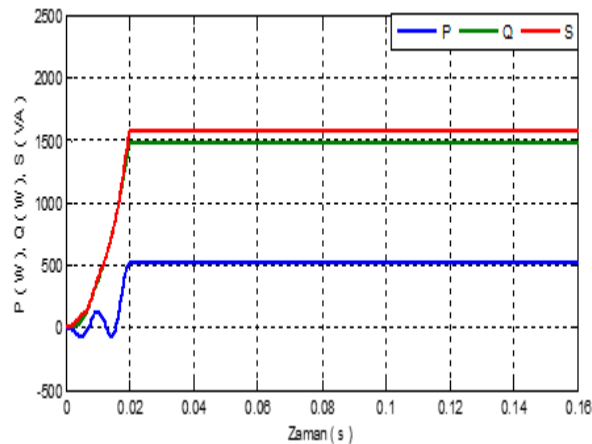
Alternatif Akım Parametreleri	
Kaynak gerilimi (rms), V_s	220V
Kaynak frekansı, f	50Hz
Bir Fazlı PAGF'nin Parametreleri	
DC tarafı kaynak gerilimi	450 V
Hat indüktansı, L_F	20mH
Histerezis bant aralığı, h	$\pm \%0.1$
İndüksiyon Motor Parametreleri	
$R_1=2.02 \Omega$	$L_2=5.6e-3H$
$R_2=4.12 \Omega$	$L_m=0.1772 H$
$L_1=7.4e-3 H$	(%) $s= 15$
$P = 2$	$n_m= 1275 d/d$
2.2 kW	Kondansatör yol vermeli

ASM'nin, paralel aktif filtre pasif olduğu durumda kaynaktan çektiği akım Şekil 8'de verildiği gibidir. Bu şekilde gösterildiği gibi, boşa kaynaktan çektiği akım gerilimden geride kalmaktadır. Diğer bir ifade ile ASM kaynaktan aktif gücün yanında reaktif güçte çekmektedir. Şekil 9'da ASM'nin kaynaktan çektiği güçler verilmiştir. ASM boşa genelde %1-%2'lik bir kayma değeri ile çalışırken, yaklaşık olarak aktif gücün üç katına yakın reaktif güç çekmektedir. Motor yüklendikçe kayma değeri artmakta ve kaynaktan çekilen reaktif güç azalmaktadır.



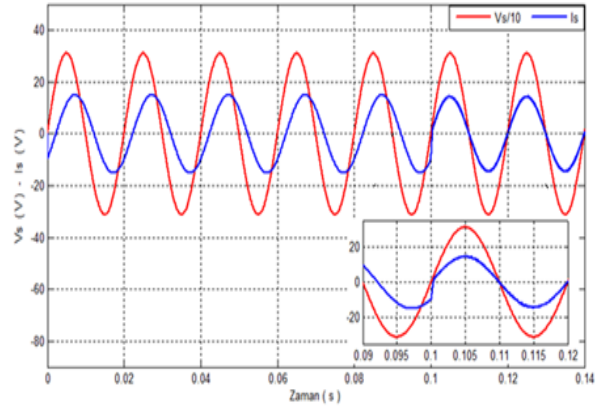
Şekil 8. ASM boştaki çalışırken kaynak gerilimi ve akımı

Kaynaktan çekilen bu indüktif özellikli reaktif gücün sıfıra yaklaştırılabilmesi için yapılması gereken, reaktif gücü meydana getiren harmonikli akımla aynı büyüklükte fakat kapasitif özellikli reaktif güç kaynağa enjekte etmektir. İndüksiyon motorda yük değeri değiştikçe kaynaktan çekilen reaktif güç değeri de değişmektedir. Reaktif güçteki bu anlık değişimlere pasif filtreler hızlı cevap veremezler. Bundan dolayı pasif filtreler ile yapılan kompanzasyonlar sınırlı sonuçlar üretmektedir. Bir fazlı paralel aktif güç filtresi ile yapılan kompanzasyon çalışmalarında sonuçlar daha verimli ve değişimlere karşın çok daha duyarlı olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 9. ASM boştaki çalışırken kaynaktan çekilen aktif, reaktif ve görünür güçler

Bu çalışmada sonuçlar elde edilirken %10 ve %15 gibi iki farklı kayma değeri kullanılmıştır. Benzetimde seçilmiş bu kayma değerleri olarak sırası ile tam yüke yakın bir değer ile benzetim kayma parametresi değeri olup, benzetim çalışması koşullarını ifade etmektedir. ASM %10'luk bir kayma ile çalışırken kaynak akımı ve kaynak gerilimi Şekil 10'daki gibi olmaktadır. Bu şekilde 0 – 0,1 saniye aralığında PAGF pasif durumdayken 0,1'ci saniyede aktif yapılmakta ve filtre aktif yapıldıktan sonra akımla gerilim arasındaki faz farkı çok kısa bir zaman aralığında sıfır olmaktadır.

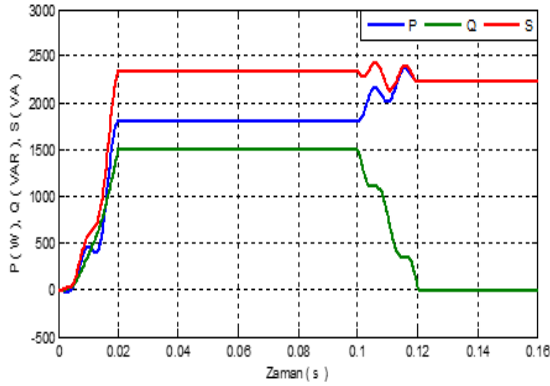


Şekil 10. ASM %10 kayma ile çalışırken kaynak gerilimi ve akımı

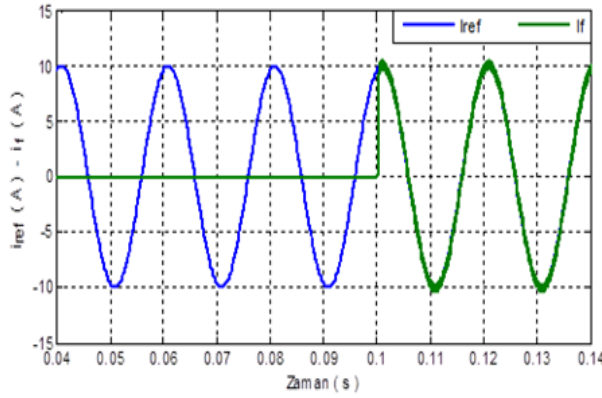
Akımla gerilim arasındaki faz açısının sıfır olması çekilen reaktif gücün sıfır olmasını ifade eder.

Kaynaktan çekilen reaktif güç ise 1500VAR'dan 0.02 saniyelik bir tepki süresinden sonra sıfır seviyelerine düşmektedir. Ayrıca aktif güç incelenecek olursa, 1800W'tan yaklaşık 2230W değerine çıkmıştır. Çünkü görünür güç, aktif ve reaktif güçlerin vektörel toplamıdır.

ASM'nin %10 kayma ile çalışırken kompanzasyon için gerekli referans ve filtre akımları Şekil 12'de verilmiştir. Şekilden, 0.1'ci saniyede aktif filtre devreye alınınca filtre akımı üretilen referans akımın üzerine binmekte ve önceden belirlenen histerezis bant aralığında referans akımı takip etmektedir.



Şekil 11. ASM %10 kayma ile çalışırken kaynaktan çekilen aktif, reaktif ve görünür güçler

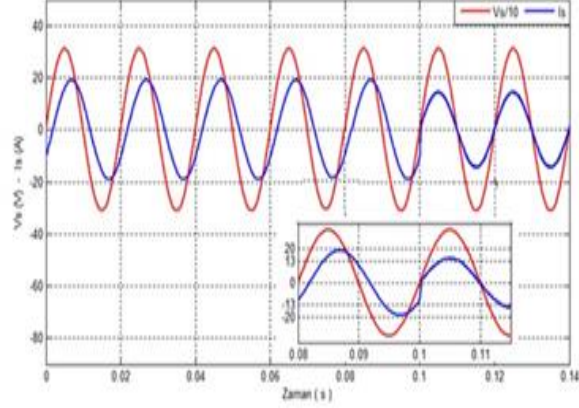


Şekil 12. ASM %10 kayma ile çalışırken referans ve filtre akımları

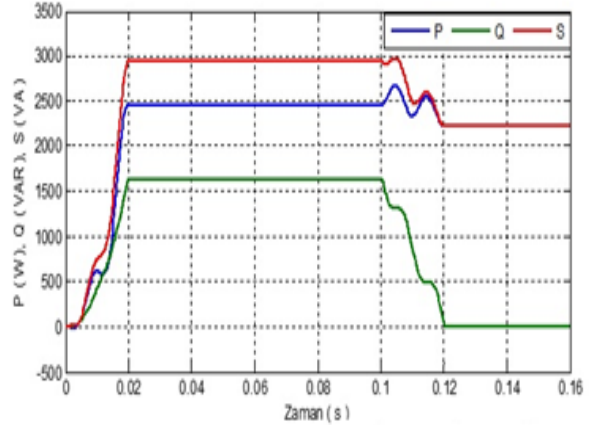
ASM'nin çalışma koşulu aynı zaman dilimleri için %15 kayma ile yeniden denemmiş ve alınan sonuçlar alt tarafta verilmiştir. Bu koşullarda 0,1'ci saniyeye kadar PAGF pasif iken 0,1'ci saniyede aktif yapılmış ve kaynak akım, gerilim değerleri alınarak Şekil 13'de gösterilmiştir. Bu şekil incelendiğinde 0-0,1 saniye aralığında PAGF pasif durumdayken 20A olan akım 0,1'ci saniyeden sonra yaklaşık 15A değerine düşmüştür. Bu durumda, çekilen kaynak akımının azalması çalışma veriminin artması şeklinde yorumlanır.

ASM'nin %15 kayma koşulunda benzer zamanlama dilimi ile PAGF devreye alınmış ve kaynak güçleri Şekil 14'de verilmeye çalışılmıştır. Şekilden reaktif güç 1650VAR civarlarında iken sıfır seviyelerine düşmüş, aktif güç ise 2450W'tan 2230W seviyesine inmiştir. Güç değişimlerinden de görüleceği üzere reaktif güç kompanzasyonu ile

birlikte motorun kaynaktan çektiği aktif güç azalmıştır.

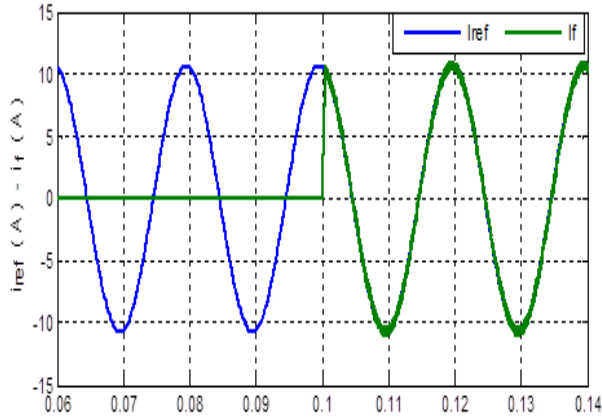


Şekil 13. ASM %15 kayma ile çalışırken kaynak gerilimi ve akımı



Şekil 14. ASM %15 kayma ile çalışırken kaynaktan çekilen aktif, reaktif ve görünür güçler

Bu azalma tüketiciyi olumlu yönde etkilemektedir. ASM PAGF ile çalışırken, %10 kaymada aktif güç yaklaşık 1800W değerinden 2230W seviyesine çıkarken, %15 kaymada ise 2450W seviyelerinden 2230W seviyelerine düştüğü gözlenmiştir. Bu durum, aktif filtre devreye alındığında tam yükte çalışırken kaynaktan çekilen akım düşmekte (Şekil 13), aktif güç azalmaktadır (Şekil 14). Bu değerlerin azalması verimin artması olarak açıklanabilirken, ayrıca hem üretici hem de tüketici için (ASM besleme kablosu, v.b) düşünülürse avantajlı bir durum olarak kabul edilebilir.



Şekil 15. ASM %15 kayma ile çalışırken referans ve filtre akımları

ASM'nin %15 kayma ile çalışırken referans akım ve filtre akımı Şekil 15'de verilmiştir. 0.1'ci saniyede filtre devreye alınca filtre akımı üretilen referans akımın üzerine binmekte ve ayarlanan histerezis bant aralığında referans akımı takip etmektedir.

5. Sonuçlar

Bu çalışmada bir fazlı indüksiyon motorun reaktif güç kompanzasyonu için bir fazlı indüksiyon motorun tam elektriksel eş-değer devresi kullanılmıştır. Sonuçlar değerlendirildiğinde elde edilen veriler, reaktif güç kompanzasyonu işleminin başarılı bir şekilde gerçekleştiğini göstermiştir. Bir fazlı paralel aktif güç filtresi kaynağa paralel bağlanırken geçici durumdan çıkıldığında aktif filtrenin devreye alınması için bir temsili anahtar kullanılmıştır. Böylece, anahtar devreye girmeden önce bir fazlı indüksiyon motorun normal çalışma parametrelerine ulaşmasına izin verilmiştir. Aktif filtre devreye alındıktan yaklaşık 0.02 saniye sonra kaynaktan karşılan reaktif güç aktif filtreden karşılanmaya başlamıştır.

PAGF'nin yük değişimlerine karşı verdiği tepkileri ölçmek için iki farklı kayma değerleri kullanılmıştır. Bu kayma değerleri sırası ile %10 ve %15 seçilmiştir. Seçilen bu kayma ASM'nin tam yüke doğru yüklendiğini ifade etmektedir. Her iki kayma değerinde de, yani farklı yükler altında, bir fazlı paralel aktif güç filtresinin kayma

değişimlerine karşı, başarılı bir şekilde reaktif güç kompanzasyonu yaptığı gözlemlenmiştir. Birbirinden farklı bu iki kayma durumunda motor kaynaktan farklı değerlerde reaktif güç talep etmiştir. ASM boşta çalışırken çekilen reaktif güç, aktif gücün yaklaşık üç katı iken, motor yüklendikçe yani kayma değeri arttıkça kaynaktan çekilen reaktif gücün aktif güce yaklaştığı (hatta daha alt değerlere düştüğü) izlenmiştir. Aktif filtrenin bu reaktif güç değişimlerine karşı dinamik tepkisinin başarılı olduğu sonuç grafiklerinden görülmüştür. Özellikle ASM tam yük değerlerine doğru yüklendikçe çektiği akım ve aktif gücün azaldığı, böylece çalışma veriminin arttığı kanaatine varılmıştır. Doğru akım tarafı besleme kaynağı 450V'luk bir dc gerilim gerektirmektedir. Bu gerilim geleneksel yapılarda şebekeden doğrudan elde edilmesi mümkün değildir. Çalışmada DC gerilimin yenilenebilir bir kaynaktan (literatürde EES (Energy Storage System) olarak tanımlanmakta), akü/akü gruplarından veya PV modellerinden sağlanabileceği düşünülmüştür.

6. Semboller

- $V_{(t)}$:kaynak gerilimi
- V_m :kaynak gerilimi tepe değeri
- $u_{(t)}$:kaynak gerilimi birim sinüs sinyali
- $i_{s(t)}$:kaynak akımının anlık değeri
- $i_{l(t)}$:referans akımının anlık değeri
- $i_{f(t)}$:filtre akımının anlık değeri
- R_1 :stator sargısı omik direnci
- x_1 :stator sargısı kaçak reaktansı
- R_2 :rotor sargısı omik direnci
- x_2 :rotor sargısı kaçak reaktansı
- s :rotor kayması
- R_s : rotor yük direnci
- X_m : mıknatıslama reaktansı
- l_m : ortak indüktans
- P : kutup çifti

7. Kaynaklar

1. Özdemir, E., Özdemir, Ş., Kale, M. (2002). Aktif Güç Filtresi İle Harmonik Ve Reaktif Güç Kompanzasyonu, *ELECO'2002Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Mühendis Sempozyumu*, 135-139.

2. Uçar, F., (2012). Paralel Aktif Güç Filtresi Kullanarak Harmonik Ve Reaktif Güç Kompanzasyonu Yapılması, *Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*.
3. Avcı, T., (2008). Akım kaynaklı aktif güç filtresi için çeşitli kontrol yöntemlerinin karşılaştırılması, *Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*.
4. Das, J. C., (2004). Passive filters-potentialities and limitations, *IEEE Trans. On Indst. Appl.*, **40 (1)**: 232-241
5. Kaplan, O., (2011). Bir fazlı paralel aktif güç filtreleri için sensörsüz da gerilim kontrolü, *Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*.
6. Çolak, İ., Kaplan. O., (2011). Bir Fazlı Aktif Güç Filtreleri için sensörsüz DA Gerilim Kontrolü, *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.*, **26**, No:1, 223, 232.
7. Gyugyi, L., Strycula, E. C., (1976). Active AC Power Filters, *IEEE Ind. Appl. Ann. Meeting*, 19C: 529-535.
8. El-Habrouk, M., Darwish, M. K., Mehta, P., (2000). Active Power Filters: A Review, *IEE Proc. Electric Power Appl.*, **147(5)**: 403-413.
9. Golsorkhi, S. M., Binandeh, H., Moghani, S., Gharehpetian, B. G., Hosseini, H., (2010). Harmonic Current Compensation by a Single Phase Shunt Active Power Filter Based On Least Compensation Current Control Method, *IEEE PECon2010 Conf. Rec.*, 125-128.
10. Bohonsle, D. C., Kelkar, R., B., (2011). Desing and Smulation of Single Phase Shunt Active Power Filter using MATLAB, *IEEE PECon2010 Conf. Rec.*, 237-241
11. Mutlu, H.H., (2011). DSP tabanlı paralel aktif güç filtresi ile harmonik ve reaktif güç kompanzasyonu, *Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*.
12. Qiao, C., Smedley, K. M., Maddaleno, F., (2001). A Comprehensive Analysis and Design of a Single Phase Active Power Filter with Unified Constant-frequency Integration Control, *IEEE PESC Conf. Rec.*, 1619-1625.
13. Singh, B., AL-Haddad, K., Chandra, A., (1999). A Review of Active Filters for Power Quality Improvement, *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, Vol. 46, No.5, October, 133-138.
14. Rahim, N. A., Mekhilef, B., Islam, Z., (2005). A New Approach for Harmonic Compensation Using Single-phase Hybrid Active Power Filter, *IEEE TENCON Conf.*, Pages:1-5
15. Pires, V. F., Silva, J. F. A., (2002). Teaching Nonlinear Modeling, Simulation, and Control of Electronic Power Converters Using MATLAB/SIMULINK, *IEEE Transactions on Education*, **45 (3)**: 253-261.

PTA Kaplamalarda Abrasiv Aşınma Davranışının Değerlendirilmesinde; Bir Taguchi Yaklaşımı

Ali Kaya GÜR, Sinan KAYA

Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metallurji ve Malzeme Mühendisliği, Elazığ, Türkiye
akgur@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 25.04.2017; Kabul/Accepted: 14.06.2017)

Özet

Bu çalışmada, ferritik paslanmaz çeliklerden AISI 430'un yüzeyi birbirinden farklı karbür oluşturan metal alaşım elementleri plazma transferli ark kaynak kaplama yöntemiyle alaşımlandırılmıştır. Birbirinden farklı oluşturulan bu kaplama tabakaları farklı aşındırıcı, yük ve mesafe parametrelerinde Taguchi dizaynına göre aşındırılmıştır. Abrasiv aşınma kütle kayıp sonuçları Taguchi metodunun en düşük-en iyi kontrol karakteristiği ile optimize edilmiş olup sonuçlar grafiksel yöntemlerle analiz edilmiştir. Çalışma sonunda elde edilen gerçek veriler, L₂₇ (3*4) ortogonal diziniyle oluşturulmuş, geri kalan aşınma sonuçları da teorik olarak hesaplanmıştır.

Anahtar Kelimeler: PTA kaplama, Taguchi, Metal Karbür.

The Evaluating Of Abrasive Behavior In PTA Coatings; A Taguchi Approach

Abstract

In this study, different carbide-forming alloy elements from each other, AISI 430 ferritic stainless steel is alloyed with the surface of the plasma transferred arc welding coating. These differently formed coating layers are eroded according to the Taguchi design in different abrasive, load and distance parameters. Abrasive wear mass loss results were optimized with the lowest-best control character of the Taguchi method and the results were analyzed using graphical methods. At the end of the study; the actual data obtained were generated with the L₂₇ (3 * 4) orthogonal array, and the results of the remaining wear were theoretically calculated.

Keywords: PTA coating, Taguchi, Metal Carbide.

1. Giriş

Son yıllarda üretim yönetimi araçlarında da gelişmeler olmuş ve günümüz gereksinimleri için teknikler ortaya konmuş yâda yıllardır teoride kalmış yöntemler uygulama alanına geçirilmiştir. Bunlardan biri de, özellikle sanayileşmiş ülkelerde kullanılmakta olan deney tasarım teknikleridir. Tasarım için teklif edilen istatistiksel deneyler, ürün parametrelerinin ve parametre sayılarının artması sonucu, ürün maliyetinin yükselmesine ve hızlı bir şekilde neticeye ulaşılamadığından dolayı da uygulanabilirliğini tamamen yitirmektedir. Ancak Taguchi uzun yıllar yaptığı çalışmalar sonucunda, çok az deneme ile çok iyi neticeler veren ortogonal dizileri geliştirmiştir[1]. Ortogonal diziler, faktör seviyelerini, teker değiştirmek

yerine, eş zamanlı değiştirmeyi önermektedir. Bu sayede, deney tasarımında Taguchi yaklaşımı kimya ve elektronik sektöründe olduğu gibi üretim sektöründe kabul görmüştür. Taguchi, deneysel yöntem açısından önemli bir yenilik getirmemesine rağmen, sanayi uygulamalarına yönelik yeni fikirler ortaya atarak ve başarılı uygulamalar sergileyerek, deney tasarımı yönteminin imalat sektöründe kabul görmesinde büyük katkılarda bulunmuştur[2]. Taguchi metodunun esas amacı; kontrol edilebilen değişkenlerin belirli seviyelerde zaman ve maliyet açısından etkin, aynı zamanda kontrol edilemeyen faktörlerin tüm kombinasyonlarına karşı duyarsız ürünler/prosesler tasarlamaktır. Taguchi Deney Tasarım tekniği; ürünlerin kalitesinin olmasının yanı sıra, kalite geliştirmede

çok daha az deneme ile daha iyi sonuç alma imkânını vermektedir[1]. Taguchi deneysel tasarım yöntemi deneysel çalışmalar da hızlı ve kolay sonuç alabilmek için deney sayılarını azaltarak yapılan bir deneysel tasarım yöntemidir. Bu yöntem ilk defa Genichi Taguchi adında bir Japon Mühendis tarafından tanıtıldı[3]. Günümüzde Taguchi deney yöntemi kullanılarak yapılmış birçok imalat ve metalurji alanında çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmalarda kontrol edilebilen faktörlerinin, kontrol edilemeyenlere göre ortogonal dizinleri kullanılarak çalışılmıştır[4-9].

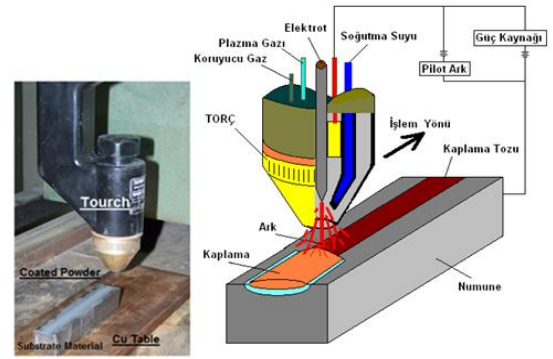
Son yıllarda PTA ile yüzey kaplama işlemlerinde, metal yüzeylerinin dış ortamlardan korunması veya kullanım alanına göre; maruz kaldığı yorulma, sürtünme ve aşınmaları ortadan kaldırmak veya minimuma indirmek amacıyla pek çok çalışma yapılmıştır [10-16].

Plazma transferli ark (PTA) kaynak yüzey kaplama işlemi, kaplama tozları kaplanacak malzemenin yüzeyinde plazma transferli ark kaynak yöntemiyle oluşturulan ergiyik havuza ayrı bir toz besleme ünitesiyle yedirilir. Bununla birlikte, kaplama tozları malzemenin yüzeyine özel bağlayıcılarla yapıştırılarak da kaplama işlemi gerçekleştirilmektedir[17-18]. Tozlar, plazma transferli ark kaynak yöntemi tarafından verilen enerjiyle ergitilerek kaplama işlemi yapılmaktadır. Yüzey özellikleri ve kalitesi, kaplama işlemini gerçekleştirecek kaplama yöntemine ve seçilen alaşımlara bağlıdır. Bu yüzden, plazma transferli ark kaynak yöntemi ve lazer kaplama gibi yüksek enerji yoğunluklu kaynaklar kullanılarak yapılan yüzey kaplamaları, yüzeylerin mekanik, korozyon ve tribolojik özelliklerini geliştirmek için yaygın olarak kullanılmaktadır [19-24].

Bu çalışmada, AISI 430 ferritik paslanmaz çeliğin yüzeyi PTA metoduyla FeCrC, SiC ve B₄C tozlarıyla aynı parametrelerde kaplanmıştır. Kaplama tabakaları abrasive aşınma direnci, Taguchi dizayn metodunun L₂₇ (3*4) ortogonal dizini kullanılarak en düşük en iyi kontrol özelliğiyle deneysel ve istatistiksel olarak optimize edilmiştir. Taguchi metoduyla, kaplama tabakasının aşınma direncinde uygulanan parametrelerinin abrasiv aşınma direncine etkisi değerlendirilmiştir.

2. Deneysel Çalışmalar

Bu çalışmada; AISI 430 ferritik paslanmaz çelik 100*14*14 altlık mazlemesi olarak kullanıldı. AISI 430 ferritik paslanmaz çelik yüzeyine 6 mm genişliğinde 1 mm derinliğinde kannallar açıldı, Şekil 1'de görülmektedir. Plazma transfer ark kaplama metodundan önce AISI 430 ferritik paslanmaz çeliğin yüzeyi etanolla yıkanıp kurutularak temizlendi. Kaplanacak FeCrC, SiC ve B₄C tozları bu kanallara alkolle ıslatılarak serildi ve numuneler sonrasında 250 C sıcaklıkta fırında 30 dakika kurutuldu. Kaplamada kullanılan altlık malzemenin ve kaplama tozlarının kimyasal bileşimi Tablo 1'de verilmiştir. PTA yöntemiyle yüzey alaşımlama işleminde kullanılan işlem parametreleri Tablo 2'de verilmiştir.



Şekil 1. Kaplama nununesi, PTA torcu ve PTA yüzey alaşımlamanın şematik görüntüsü

Tablo 1. Kaplama malzemesinin ve kaplama tozlarının kimyasal bileşimi

	Fe	Cr	C	Si	Mn	P
AISI 430	Kalan	12-14	0,08	1	1	0,04
FeCrC	16,27	70,21	12,44	1,08	-	-
SiC			% 99 saf			
B ₄ C			% 99 saf			

Plazma transferli ark kaynağı yöntemi ile yüzey kaplama işlemleri 150 A'de gerçekleştirildi. Argon koruyucu gazın akış hızı 25 m³ / sa olarak seçilirken, plazma gazının akış hızı 0,5 m³/sa olarak seçildi. Plazma transferli ark kaynağı yöntemi ile yapılan kaplama malzemesinin makro görünümü Şekil 2' de verilmektedir.

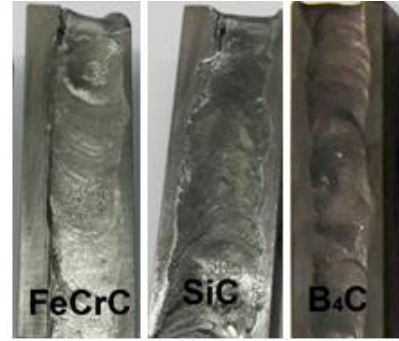
PTA yöntemi ile kaplandıktan sonra kaplama tabakasında herhangi bir çatlak veya bozluğa rastlanmamıştır. Kaplama tabakasının kalınlığı, ve mikroyapısının optik mikroskopisi Şekil 3’de görülmektedir

PTA yöntemi ile farklı metallerle yüzeyi alaşımlandırılıp kaplanmış AISI 430 ferritik paslanmaz çeliğin optik mikroyapısı incelendiğinde kaplama tabakaları altlık malzemesinden kaplama tabakasının yüzeyine doğru dentritik katılaşmalar görülmektedir. Kaplama tabakalarında üçlü karbür fazlarının yanısıra kaplama türüne bağlı olarak $Fe_3(C,B)$, M_7C_3 , $Cr_{23}C_6$, $Fe (Cr,B)$ SiC and B_4C gibi sert bileşikli fazlarında oluşmuştur. Şekil 4’de XRD analiz sonuçları verilmiştir. Abrasiv analizler için, aşınma numuneleri 10*10*10 mm ebatlarında kaplama numunesinin merkezinden olacak şekilde kesilmiştir.

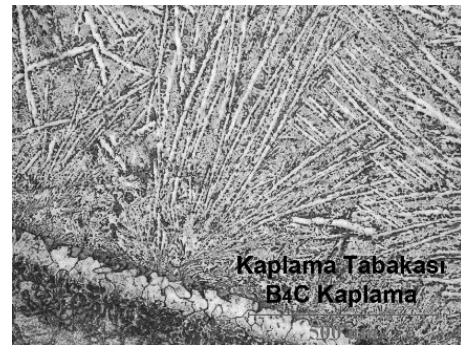
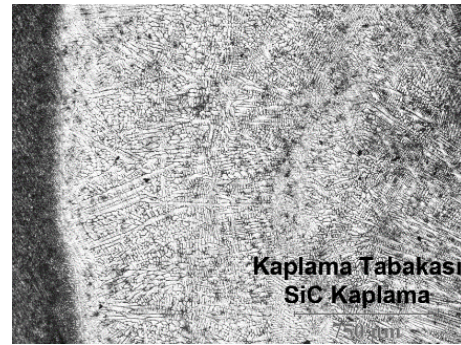
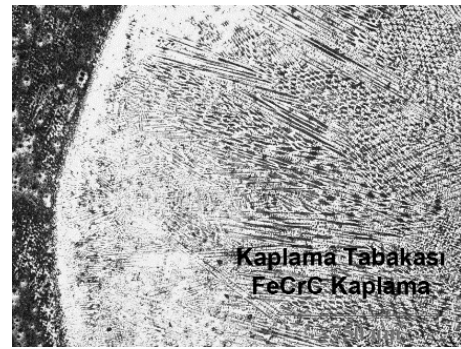
Tablo 2. PTA Kaynak kaplamanın deneysel parametreleri

Parametre	Değer
Akım (A)	150
Gerilim (V)	19
Koruyucu Gaz (Ar, m ³ /h)	25
Plazma Gazı (Ar, m ³ /h)	0.5
Elektrot Çapı (mm)	4.8
Elektrot Türü	% 2 Th, Tungsten (W)
Kaynak Hızı (mm/s)	0.15
Torç ile Kaplama Tabakası Arası Mesafe (mm)	3≈ 4
Torç Uç Çapı (mm)	3.25
Elektrot-Torç Mesafesi, Set Back (mm)	3

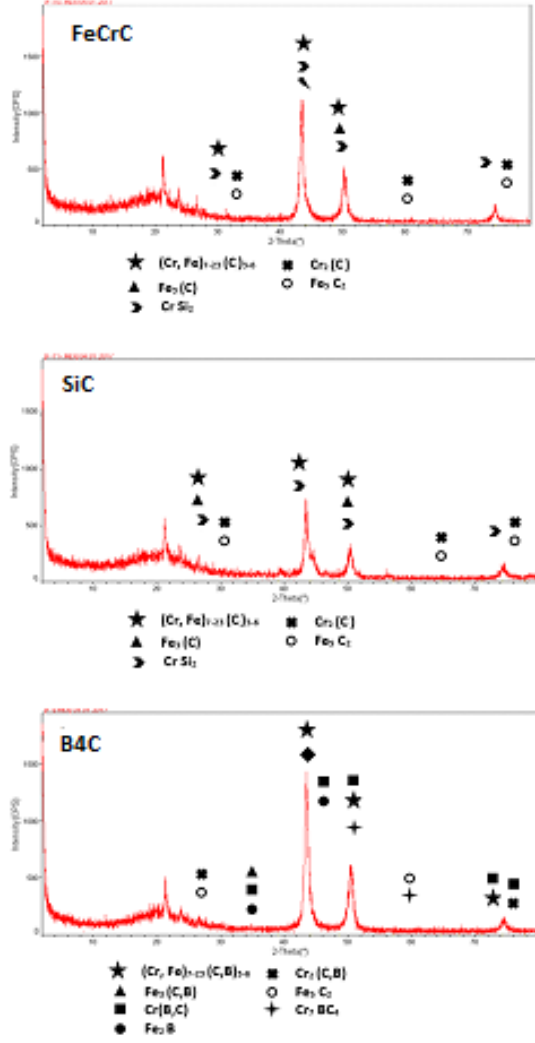
Abrasiv aşınma işlemleri şematik ve normal görüntüsü Şekil 5’de verilen aşınma aparatında pin-on disc sistemiyle yapılmıştır. Aşındırılacak numunenin kaplama tabakası aşındırıcıya 90°’lik açı ile yüklenerek 16 dev/dak. hızında abrasiv aşındırıcıya temas ettirilmiştir. Abrasiv aşınma işleminde sonuçlar, kütle kaybı hesaplanarak değerlendirilmiştir. Abrasiv aşınma işlemi 16-60-220 meshlik aşındırıcılarda, 10-20-30 metre mesafede ve 6-10-16 N yükler altında Taguchi deney tasarım yöntemi ile değerlendirilmiştir. Her aşınma işlemi sonrasında aşındırıcı yüzeyi temizlenmiştir. Şekil 4’de aşınma işlemi görülmektedir.



Şekil 2. Alaşımlanan tabakanın dijital görüntüsü



Şekil 3. FeCrC, SiC ve B₄C kaplamanın optik görüntüsü

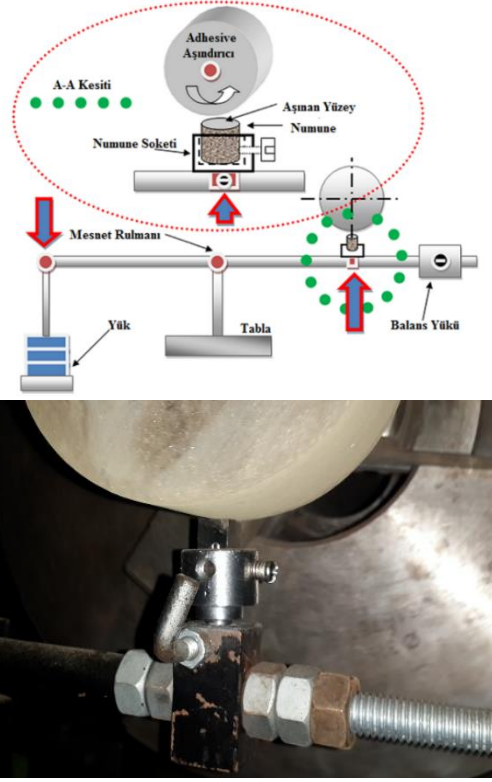


Şekil 4. Numunelerin XRD analiz sonuçları

3. Taguchi Deney Dizaynı ve Sonuçları

PTA Yüzey kaplama işleminde dört farklı parametre ve her bir parametrenin üç farklı seviyesi kullanıldı. Aşınma deneyleri sonucunda elde edilen aşınma kütle kayıpları ve bu deney sonuçlarının en küçük en iyi karakteristiğine göre elde edilen S/N oranları verilmektedir. Parametre olarak, kaplama tabakası, aşındırıcı tane boyutu, aşınma mesafesi ve uygulanan yük. Bu parametreler ve seviyeleri Tablo 3'de görülmektedir.

Taguchi aşınma planı Tablo 3'de ki parametrelerin üçlü seviyeleri kullanılarak hesaplanmış ve orthogonal L_{27} (4×3) dizini kullanılmıştır.



Şekil 5. Abrasive aşınma aparatının şematik görüntüsü ve aşınma temas resmi

Bu çalışmada Taguchi deney tasarımında S/N yardımıyla elde edilen izafi kütle kaybı verilerin en düşük aşınma değerlerini elde etmektir. Taguchi Deney Tasarımı yönteminde elde edilen deney sonuçları Sinyal/gürültü (S/N) oranına çevrilerek değerlendirilmektedir.

Tablo 3. Kontrol faktörleri ve seviyeleri

Sembol	Test Parametere	Seviye I	Seviye II	Seviye III
A	Kaplama Tabakası	FeCrC	SiC	B ₄ C
B	Aşındırıcı Grid	16	60	220
C	Aşınma Mesafesi (mt)	10	20	30
D	Uygulanan Yük (N)	6	10	16

Sinyal/Gürültü oranı değeri küçük olan değer iyi, büyük olan değer iyi, nominal değer iyi olarak kalite değerlerinin hedeflendiği değere göre farklı şekillerde hesaplanır ve analiz edilir. Diğer önemli bir nokta ise deney tasarımının dengeli olmasıdır, yani faktörlerin birbirinden bağımsız olarak değerlendirilmesini sağlaması ve bunun

içinde tasarımda faktörlerin farklı seviyeleri için her test edilen şart altında eşit sayıda örnekleme yapılmasıdır. Taguchi'nin standart tasarımları bu sistem üzerine kurulmuştur [19,20].

Bu yaklaşımdan yola çıkarak “en küçük en iyidir” analizi kullanılmıştır. PTA Yüzey kaplama işleminde dört farklı parametre ve her bir parametrenin üç farklı seviyesinin abrasiv aşınmalarının tamamı yapılsa 81 deney, Taguchi deney tasarımı ile ise tasarımın S/N analizi L_{27} ortogonal dizini kullanılarak bu deneyler yapılmadan hesaplanmıştır. L_{27} ortogonal dizinine göre elde edilen kütle kayıpları Tablo 2 ve Tablo 3’de ise hesaplanan toplam 81 kütle kaybı ve S/N analizi görülmektedir.

Tablo 4. L_{27} ortogonal dizini ve gerçek kütle kayıpları

Sıra No	Kontrol Faktörleri				Ölçülen Kütle Kaybı (gr)	S/N oranı (dB)
	A	B	C	D		
1	16	10	6		0,0184	34,70364354
2	16	10	6		0,0171	35,34007779
3	16	10	6		0,0185	34,65656543
4	60	20	10		0,0053	45,51448261
5	60	20	10		0,0041	47,74432287
6	60	20	10		0,0049	46,1960784
7	220	30	16		0,0170	35,39102157
8	220	30	16		0,0193	34,2885382
9	220	30	16		0,0181	34,8464285
10	16	20	16		0,0088	41,11034656
11	16	20	16		0,0078	42,15810795
12	16	20	16		0,0091	40,81917215
13	60	30	6		0,0032	49,89700043
14	60	30	6		0,0017	55,39102157
15	60	30	6		0,0025	52,04119983
16	220	10	10		0,0039	48,17870786
17	220	10	10		0,0089	41,01219987
18	220	10	10		0,0055	45,19274621
19	16	30	10		0,0074	42,61536561
20	16	30	10		0,0065	43,74173287
21	16	30	10		0,0070	43,0980392
22	60	10	16		0,0028	51,05683937
23	60	10	16		0,0032	49,89700043
24	60	10	16		0,0035	49,11863911
25	220	20	6		0,0051	45,84859648
26	220	20	6		0,0038	48,40432807
27	220	20	6		0,0045	46,93574972

Taguchi tasarımlarında en çok kullanılan istatistik değerdendir biri S/N oranıdır ve bu oran sağlam tasarımın performansını ölçmek için kullanılır. En yüksek S/N oranı deney tasarımında istenen optimum nokta olan en düşük değere hesaplanmış kütle kaybına takabül eder [21]. Yapılan deneysel çalışmada optimum sonucu elde etmek için kullanılan parametre seviyelerinin en yüksek S/N oranı olan seviyeleri alınır. Optimum

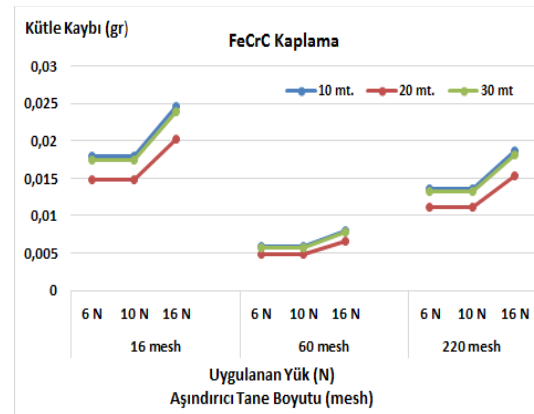
değerler A3B1C2D2 eşitliği yardımıyla aşağıdaki formüller yardımıyla hesaplanır [25]. Şekil 6-8’de ki grafikler aşağıdaki formüller sayesinde hesaplanmaktadır. Aşağıdaki formüllerde η en yüksek S/N değeri wt ise optimum en küçük en iyi aşınma değerini göstermektedir.

$$\text{Optimum } \eta = \eta_m + \sum_{i=1}^j (\eta_i - \eta_m) \quad (1)$$

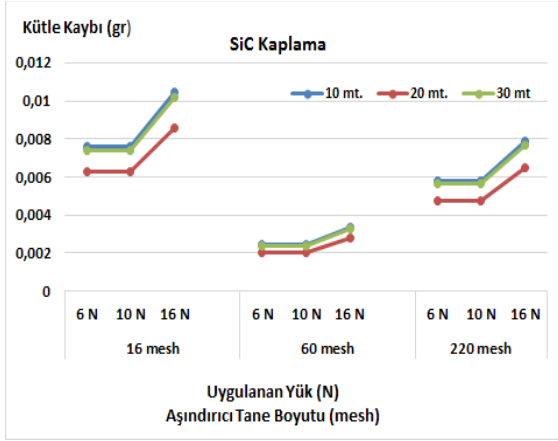
$$wt = \sqrt{10^{-\frac{\text{optimum } \eta}{10}}} \quad (2)$$

AISI 430 çeliğinin aşındırılmış yüzeyinin abrasiv aşınması sonucunda elde edilen veriler değerlendirildiğinde 68 numaralı deneyde elde edilecek olan veriler, en yüksek S/N değerinde olduğu gösterir. B_4C kaplı bu numunede 60 gridlik aşındırıcıda 20 metre mesafede ve 10 N yük altında 0,001886073 gr kütle kaybı ve 54,48882977 S/N değeri olarak ölçülmüştür.

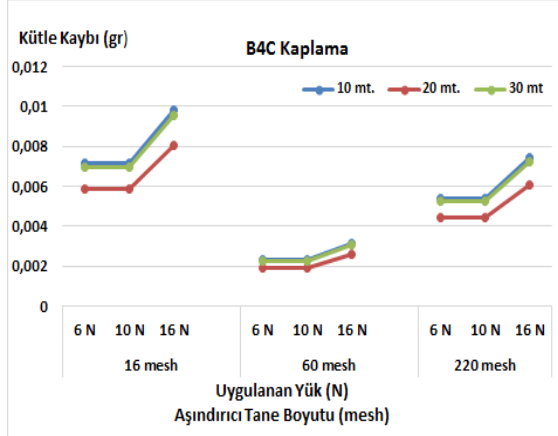
Şekil 6-8’de “en küçük en iyidir” teorisine göre hesaplanan teorik aşınma değerleri grafikleri ve L_{27} ortogonal dizinine göre elde edilen kütle kayıpları grafikleri verilmiştir. Şekil 6-8 grafiklerinde grafik üzerinde yatay eksene paralel aşındırıcı tane boyutu ve uygulanan yüklere bağlı olarak aşınma oranının, uygulanan yük arttıkça aşınmanın arttığı ancak aşındırıcı tane boyutunda böyle bir durum söz konusu değildir. Aşındırıcı tane boyutuna bağlı olarak aşındırıcı taneleri talaş oluşturmak için yüzey içine doğru yeterince uzanır ve malzeme yüzeyinden kesme yaparak talaş kaldırır [25].



Şekil 6. FeCrC kaplama tabakasının hesaplanmış kütle kaybı değerleri grafikleri



Şekil 7. SiC kaplama tabakasının hesaplanmış kütle kaybı değerleri grafikleri



Şekil 8. B4C kaplama tabakasının hesaplanmış kütle kaybı değerleri grafikleri

Şekil 9'da PTA yöntemiyle kaplanan kaplama tabakaları $L_{27}(3^4)$ orthogonal dizinine bağlı olarak abrasiv aşınma testine tabi tutulmuş ve elde edilen kütle kayıpları verilmiştir.. Şekil 9 incelendiğinde görüldüğü gibi kaplama tabakasının her bir faktörüne ve seviyesine göre farklı değişken sonuçlar elde edilmiştir. Ancak bu durum teorik olarak hesaplanmış ve oluşturulmuş

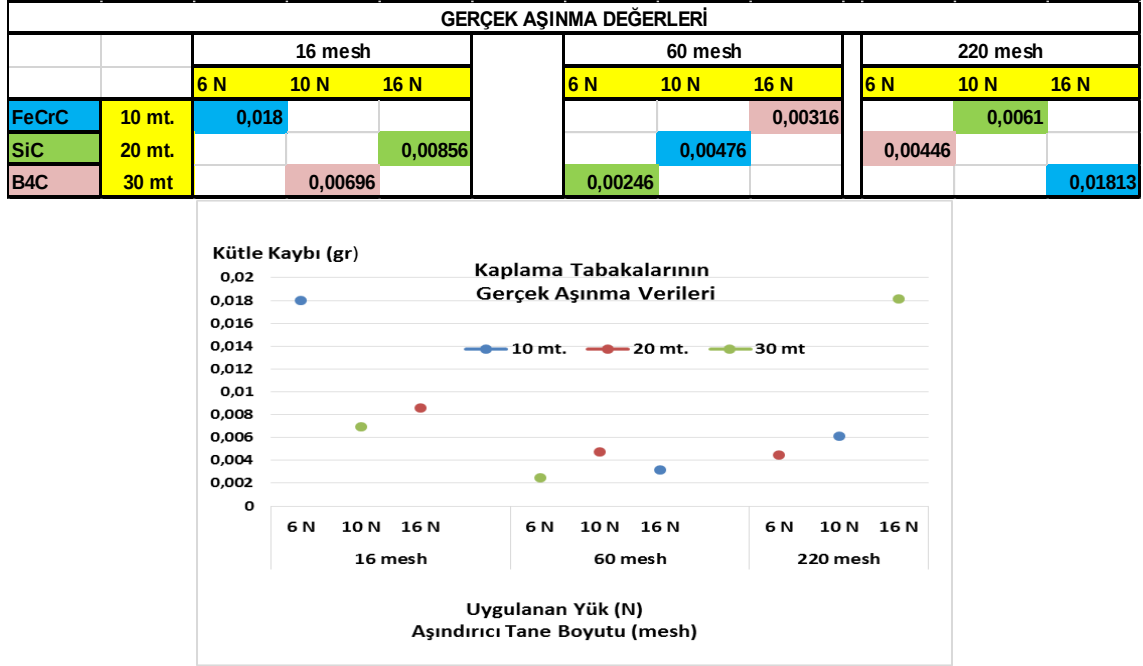
Şekil 6-8'de ki grafiklerle karşılaştırıldığında durum daha iyi anlaşılmakta ve değerlendirilebilmektedir. Her bir kaplama kendi içinde değerlendirilirse faktörlerin ne kadar etkili oldukları görülmektedir.

Talaş kaldırılamayan durumlarda ise ya aşındırıcı taneleri yüzey içine doğru uzanır fakat talaş oluşturmaya yetecek kadar değil, yüzey deforme olur ve enerji tüketilir, ama malzeme kaldırılamaz ve yüzeyde ezmeye sebep olur ya da aşındırıcı taneleri yüzeye temas eder ancak sadece sürtme/ovalama sürtünmesi oluşur, enerji tüketilir, ancak hiçbir malzeme kaldırmadan ovalama yapar.

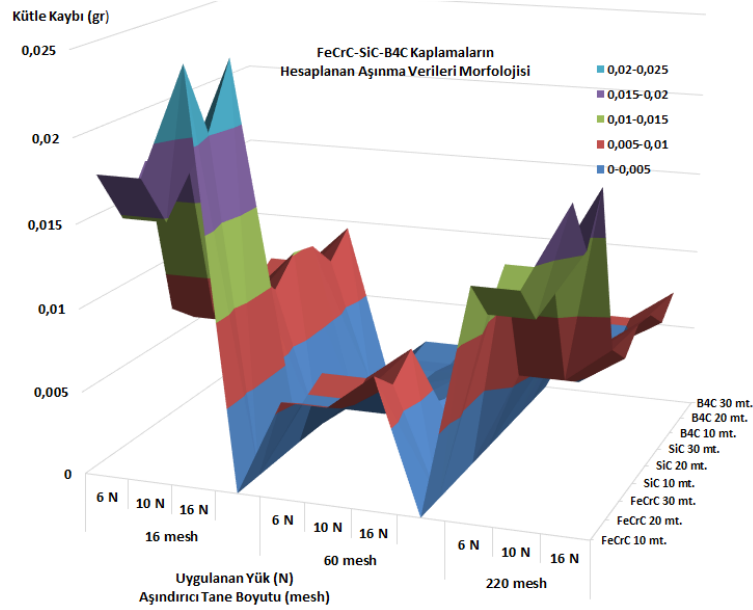
Şekil 10'da alaşımlandırılmış AISI 430 paslanmaz çelik yüzeyinde kaplama tabakasının abrasiv aşınma değerindeki düşüş-artışlar ve buna bağlı olarak elde edilen kütle kaybı grafiklerinde elde edilen parabolik aşınma çizgilerine ulaşılmıştır. Çalışma sonunda elde edilen veriler kütle kaybı, kaplama tabakası, uygulanan yük ve kullanılan aşındırıcıya bağlı olarak elde edilen kütle kayıpları verilmiştir.

4. Sonuçları ve Tartışma

Bu çalışmada AISI 430 paslanmaz çeliğin yüzeyi PTA metoduyla FeCrC, SiC ve B₄C tozlarıyla sabit enerji girdisi değerlerinde kaplanmıştır. Kaplama tabakaları $L_{27}(3^4)$ orthogonal dizinine bağlı olarak abrasiv aşınma testine tabi tutulmuş ve Taguchi deney düzeneğiyle değerlendirilmiştir. Taguchi deney tasarımındaki "en küçük en iyidir" performans karakteristiği göz önüne alınarak yapılan değerlendirme ile elde edilen en yüksek S/N değeri (-54,48882977 dB.) en düşük kütle kaybı (0,001886073 gr.) aşınma direncine tekabül edeceği 68. Satırda be B₄C kaplama tabakasında hesaplanmıştır.



Şekil 9. Kaplama tabakalarının hesaplanmış kütle kaybı değerleri grafikleri



Şekil 10. Kaplama tabakalarının kütle kaybı değerleri grafikleri

5. Kaynaklar

1. Gür, A.K. (2013). Investigating Wear Behavior By Using Taguchi Method FeCrC/B₄C Powder Alloys Coating By Plasma Transferred Arc Weld Surfacing. *MP-Materials Testing*, **55(6)**: 462-467.

2. Taguchi, G. (1995). Quality Engineering (Taguchi Methods) For The Development Of Electronic Circuit Technology. *IEEE Transactions On Reliability*, **44-2**.

3. Gür, A. K., Yiğittürk, N. ve Bilen, F.A. (2013). Analysis of Adhesive Wear Behavior of Metal Matrix Composites Additive Cr₂C₃" *I. European Conference In Technology and Society (25-27 Jun 2013)*, IUS, Sarajevo, Bosnia-Herzegovina.

4. Şahin, Y. (2005). Optimisation of testing parameters on the wear behaviour of metal matrix composites based on the Taguchi method, *Materials Science and Engineering A*, **408**: 1-8.
5. Mishra, A.K., Sheokand, R., Srivastava, R.K. (2012). Tribological Behaviour of Al-6061 / SiC Metal Matrix Composite by Taguchi's Techniques, *International Journal of Scientific and Research Publications*, 2-10.
6. Gür, A.K., Çaligulu, U., Taşkın, M. (2011). The Optimisation of Adhesive Wear Behavior of AlMgSi/SiC Alüminyum Composite with Taguchi Method, *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, **5(9)**: 1584-1590.
7. Özay, C., Ballıkaya, H. ve Savas, V. (2013). Investigation on Surface Roughness Of D3 Tool Steel Using. Tangential Cylindrical Grinding Method, *I. European Conference In Technology and Society (25-27 Jun 2013), IUS, Sarajevo, Bosnia-Herzegovina*.
8. Gür, A.K., Özay, C., Orhan, A., Buytoz, S., Caligulu, U. and Yigitturk, N. (2014). Wear Properties of Fe-Cr-C and B₄C Powder Alloy Coating on AISI 316 Stainless Steel by Taguchi Method" *MP-Materials Testing*, **56 (5)**: 393-398.
9. Ross, P.J. 1996. Taguchi techniques for quality engineering, McGraw – Hill International book company, ISBN 0-07-114663-6, 1-73.
10. Buytoz, S., Caligulu, U., Gür, A.K. and Orhan, A. (2013). Microstructural Properties of Fe-Cr-C and B₄C Powder Alloy Coating on Stainless Steel by Plasma Transferred Arc Weld Surfacing, *Arabian Jou. for Sci. and Eng.(ASJE)*, **38 (8)**: 2197-2204.
11. Yıldız, T. ve Gur, A.K. (2011). Microstructural Characteristic Of N₂ Shielding Gas in Coating FeCrC Composite to The Surface of AISI 1030 Steel with PTA Method, *Archives of Metalurgy and Materials*, **56**: 723-729.
12. Islak, S., Eski, O., Buytoz, S., Karagöz, M. ve Stokes, J. (2012). Microstructure and microhardness characterization of Cr₃C₂-SiC Coatings Produced Using the Plasma Transferred Arc Method, *Materials Testing*, **54(11-12)**,:793-799.
13. Özel, S., Somunkıran, İ., Kurt, B. ve Orhan, N. (2008). Microstructural Characteristic of NiTi Coating on Stainless Steel by Plasma Transferred Arc Process, *Surface and Coating Technology*, **202(15)**: 3633–3637.
14. K.H. Lo, F.T. Cheng, H.C. Man (2003). Cavitation erosion mechanism of S31600 stainless steel laser surface-modified with unclad WC", *Materials Science and Engineering A*, **357**, 168–180.
15. Bourithis, L., Milonas, A. ve Papadimitriou, G.D. (2003). Plasma transferred arc surface alloying of a construction steel to produce a metal matrix composite tool steel with TiC as reinforcing particles, *Surface and Coatings Technology*, **165**: 286–295.
16. Lu, S.-P., Kwon, O.-Y., Guo, Y. (2003). Wear behavior of brazed WC/NiCrBSi(Co) composite coatings, *Wear*, **254**: 421–428.
17. Xibao, W. ve Hua, L. (1998). Metal powder thermal behaviour during the plasma transferred-arc surfacing process, *Surface and Coatings Technology*, **106(2-3)**, 156-161.
18. Bourithis, G.D. Papadimitriou, (2009). The effect of microstructure and wear conditions on the wear resistance of steel metal matrix composites fabricated with PTA alloying technique, *Wear*, **266, (11-12)**, 1155-1164.
19. Xibao, W., Chunguo, L., Xiaomin, P., Libo, S. and Hong, Z. (2006). The powder's thermal behavior on the surface of the melting pool during PTA powder surfacing, *Surface and Coatings Technology*, **201(6)**, 2648-2654.
20. Vamsi Krishna, B., Misra, V. N., Mukherjee, P. S. and Sharma, P. (2002). Microstructure and properties of flame sprayed tungsten carbide coatings, *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, **20(5-6)**, 355-374.
21. Liu, X.-B. and Gu, Y.-J. (2006). Plasma jet clad γ /Cr₇C₃ composite coating on steel, *Materials Letters*, **60(5)**: 577-580.
22. Skarvelis, P. and Papadimitriou, G.D. (2009). Plasma transferred arc composite coatings with self lubricating properties, based on Fe and Ti sulfides: Microstructure and tribological behavior, *Surface and Coatings Technology*, **203(10-11)**: 1384-1394.
23. Bourithis, E., Tazedakis, A. and Papadimitriou, G. (2002). A study on the surface treatment of "Calmax" tool steel by a plasma transferred arc (PTA) process, *Journal of Materials Processing Technology*, **128(1-3)**: 169-177.
24. Huang, Z., Hou, Q. and Wang, P. (2008). Microstructure and properties of Cr₃C₂-modified nickel-based alloy coating deposited by plasma transferred arc process, *Surface and Coatings Technology*, **202(13)**: 2993-2999.
25. Gür, A.K. ve Kaya, S. (2017). "Abrasive wear resistance optimization of three different carbide coatings by the Taguchi method", *MP-Materials Testing*, **59(5)**: 450-455.

GTAW Yöntemi ile Oluşturulan FeB-FeTi-FeW-C Kaplamalarının Mikroyapı ve Adhesiv Aşınma Davranışının İncelenmesi

Zülküf BALALAN^{1*}, Mehmet YAZ², Serdar Osman YILMAZ³

¹Bingöl Üniversitesi Müh. Mim. Fak. Metalurji ve Malz. Müh. Böl., 12000 Bingöl/TÜRKİYE

²Fırat Üniversitesi Teknik Bilimler M.Y.O Makine Böl., 23000 Elazığ /TÜRKİYE

³Trakya Üniversitesi Müh. Fak. Metalurji ve Malz. Müh. Böl., 59000 Tekirdağ/TÜRKİYE

*zbalalan@bingol.edu.tr; zbalalan34@gmail.com

(Geliş/Received: 03.05.2017; Kabul/Accepted: 06.07.2017)

Özet

Bu çalışmada; FeB FeTi ,FeW ve grafit tozları, kullanılarak düşük karbonlu (%0,15 C) çeliğin yüzeyi, farklı işlem parametrelerinde, Gaz Tungsten Ark Kaynak yöntemiyle (TIG) kaplanmıştır. Elde edilen kaplama yüzeyinin mikroyapısı, optik mikroskop (OM) ve taramalı elektron mikroskopunda (SEM) incelenmiştir. Mikrosertlik ve kuru-sürtünme aşınma deneyleri yapılmıştır. Yoğun enerjili X ışını analizi (EDS) ile alaşım elementlerinin yüzeyden altlık malzemesine doğru dağılımı araştırılmıştır. Kaplama bölgesinin mikroyapısında karbür ve borürlerin oluştuğu gözlenmiştir. Elde edilen sert yüzey kaplamalarında oluşan karbür ve borürlerin şekilleri üçgenden düz kareye dönüşmüştür.

Anahtar kelimeler: FeB; FeTi; Adhesiv Aşınma; GTAW; Kaplama.

Investigation of Adhesive Wear Behavior and Microstructure of FeB-FeTi-FeW-C Coatings Produced by GTAW Method

Abstract

In this study, the surface of 0.15% C carbon steel was coated with FeB, FeTi, FeW and graphite powders applying different operation parameters via a gas tungsten arc welding (GTAW) method. The microstructure of the coated surface examined through optical micrograph (OM) and scanning electron micrograph (SEM). The carbides generated was investigated by microhardness and dry-sliding wear experiments were conducted. Furthermore, intense energy distribution X-ray analysis (EDS) was investigated from the surface of alloy elements to base plate material. The formation of carbide and borides were observed at microstructure. The shapes of the carbides and borides that formed on the obtained hard coated surfaces transformed from triangle to flat square.

Keywords: FeB; FeTi; Adhesive wear; GTAW; Coating.

1. Giriş

TIG kaynak yöntemi malzemenin yüzey özelliklerini geliştirmek için yapılan yüzey işlemlerinden biri olan, sert yüzey kaplama yöntemlerinden biridir. Bu yöntem, yüksek yoğunluklu lazer ve termal sprej yöntemleriyle orijinal kaplamalar ve malzeme üretiminde önemli gelişmeler sağlanmıştır [1-2]. Bu kaynak yöntemiyle yapılan kaplamaların kolay uygulanması ve ucuz olması benzer yöntemlere göre üstünlüğünü ortaya koymaktadır [3]. Yüzey özelliklerinin geliştirilmesiyle elde edilen mikroyapıların korozyon ve aşınma dirençleri, alışlagelmiş yüzey işlem teknikleriyle elde

edilenlere göre çok daha iyi olmaktadır [4, 5]. Bir tür alaşımlama tekniği olan TIG yöntemi; ilke olarak, uygun bileşime sahip alaşım toz veya toz karışımlarının alt tabaka malzemesinin yüzeyinde ark ısısı etkisiyle ergitilerek, kaplama katı oluşturulan bir yöntemdir. Ergime, hem ana malzemede ve hem de ilave metal ya da bileşik kaplama malzemesinde aynı anda gerçekleşir ve hızla katılaşarak, işlem bölgesinde kaplama malzemesi ile esas metal farklı bileşim ve özelliklerde katı eriyik ya da bileşik oluşturarak birbirlerine bağlanır [6-7]. Katılaşma oranı bu işlemlerle kaplama sırasında çok yüksektir.

Benzer tekniklerin avantajları, hızlı soğuma ile iyi mikroyapı elde edilmesi, yüksek sertlik elde edilmesi ve aşınma direncinin artmasıdır. Bu teknikte çeşitli geleneksel altlık malzemelerin kaplanması Fe, Cr, Co ve Ni esaslı alaşımlar kullanılır [8].

Takımların ve kalıpların kullanım ömürleri ve kaliteleri üretimde önemli faktörlerdir. Özellikle de karmaşık ve büyük yığın halindeki üretimlerde uzun yıllardır farklı teknikler kullanılarak servis ömürlerini ve aşınma dirençlerini gözle görülür arttırmak için birçok araştırma yapılmıştır. Araştırmalar sonucunda yeterli ısıl işlemler ve daha kaliteli malzemelerin uygulanması sağlanmış ve dayanıklılığı arttırmak için yüzeylerin kaplanması ve modifikasyonunun farklı yöntemlerinin geliştirilmesi sağlanmıştır. Yüzey tabakaları, kullanımda farklı şekilde sonuçlanan diğer fiziksel ve kimyasal özellikler, kristal kafesler, mikroyapı ve kimyasal özellikleri ile altlık malzemedan farklılık gösterir [9, 10].

Demir esaslı matriks kompozitler yüksek mekanik dayanımlarının bileşimi nedeniyle geniş bir uygulama alanına sahiptirler. Ara yüzey reaksiyonlarından kaçınmak ve ara yüzey uyumluluğu geliştirmek, yüksek performanslı kompozitleri üretmek için önemli teknikler kullanılmaktadır. Seramik partikül takviyeli metal matriks kompozitlerin üretimleri için yeni teknikler kullanılmaktadır [11, 12].

AISI 1018 çeliği üzerindeki bor tabakaları GTAW tekniği kullanılarak geliştirilebilir. Ergiyik bölgesindeki bor içeriğinin yükselmesi birincil Fe₂B boridleri ve az miktarda Ferrit-Fe₂B ötektikten ibaret olan bir hypo ötektik mikroyapıdan yüksek hypo ötektik mikroyapıya geçişe izin verir [13].

Bor takviyeli metal matriks kompozitler (MMC) matriks alaşımlar ile karşılaştırıldığında aşınma özellikleri ve mekanik dayanımları belirgin şekilde yükselme gösterirler ve genellikle yumuşak matriksten takviye fazına doğru uygulanan yükün dağılımı ve iletimi ile sıkıştırılma ile oluşan basınç ve yüksek gerilmelere karşı koyma kabiliyetine sahiptirler. Diğer taraftan metal matriksli kompozitler matrikslerle karşılaştırıldığında düşük dövülebilme ve ikinci derece kırılma tokluğu sıkıntılarına sahiptir ve partikül takviyeliler

genellikle pahalıdır, pahalı üretim işlemlerinden dolayı son üretimin maliyeti de yükselmektedir. Yüzey modifikasyon teknolojisi, yüksek dövülebilme ve kırılma tokluğuna sahip pahalı olmayan kaba malzemeler ile bir MMC yüzey tabakasının üstün özelliklerini birleştiren alternatif bir çözüm olarak gelmektedir. Yakın geçmişte, kompozit tabakaları Fe-B-Cr üçlü faz sistemine uygun CrB ve Cr₂B partikülleri veya Fe-B ikili faz sistemine uygun Fe₂B ve FeB kullanılarak çeliğin yüzeyinde oluşturulmuştur [14].

Sert yüzey kaplama alaşımlarının gelişme durumu bir taraftan daha verimli Fe-Cr-C veya Fe-C-B sistemleri içerirken, diğer taraftan daha pahalı tungsten karbür takviyeli sentetik çok fazlı kompozitler bulunmaktadır. Bundan dolayı, bileşiminde bor ve karbon bulunan niyobyum, titanyum ve molibdenli karmaşık Fe-esaslı alaşımlar en iyi şekildeki matriks özellikleri ile ve aşınmaya dirençli sert fazların farklı çökelmelerine göre aşınma direncinin elde edilmesiyle önemli ilerlemeler sağlanmıştır [15-17]. Fe-C-X (X=Cr, Mn, W, Mo, Ni, B vs.) alaşımları, yüksek aşınma direnci sergileyen yüzeyler ile sert yüzey kaplama malzemeleri için mükemmel adaylardır. Lazer alaşımlanmış Fe-C-X kaplamanın mikroyapısal karakterizasyonu krom konsantrasyonuna bağlı olarak, yerinden çıkmış ferrit matriksdeki M₇C₃ karbürler veya ikizlenmiş östenit iğneler ve tamamen martenzit fazın oluşumu göstermektedir [18,19]. Titanyum matriksli kompozitler (TMC_s) sabit yüksek sıcaklıklarda, yüksek elastiklik modülü, mukavemet, yüksek sertlik ve özellikle aşınma direnci uygulamalarında önemli potansiyele sahiptirler. Titanyum esaslı kompozit kaplamalar partikül takviyeyle kaplama yüzeyine olumlu etki ederler [21, 22]. TiB₂ (titanyum borid) en sert boridlerle birlikte yüksek mekanik dayanım, yüksek aşınma direnci ve yüksek sıcaklıklarda yüksek çekme dayanımı sağlarlar [23].

Bu araştırmada bir gaz tungsten kaynak yöntemi (TIG), AISI1018 çeliğinin yüzeyi FeB, FeTi ve grafit tozları ile kaplamak için yüksek enerji yoğunluğu ışınları olarak kullanılmıştır. Kaplanmış yüzeylerdeki faz dönüşümleri optik mikroskop (OM) ve taramalı elektron mikroskopları (SEM) kullanılarak ve EDS analizleri birleştirilerek sistematik olarak

çalışılmıştır. Çalışmanın amacı, adhesiv aşınma aparatı kullanılarak FeB, FeTi ve grafit tozları ile kaplanmış yüzeylerin kayma aşınma davranışlarını karakterize etmek ve aşınma ve sürtünme için var olan temel verilere dayanan sürtünme katsayısı ve aşınmayı iyileştirmektir.

2. Deneysel Çalışma

FeB, FeTi, FeW ve grafit tozlarının karışımları kaplama malzemesi olarak kullanılmıştır. 100x50x10 mm boyutlarında

düşük karbonlu çelik altlık malzemesi olarak kullanılmıştır. Altlık malzemesinin kimyasal analizi 0.15% C, 0.22% Si, 0.76% Mn, 0.034% P, 0.05% S, 0.12% Cr, 0.03% Mo, 0.10% Ni ve 0.52% Cu elementlerini içermektedir. FeB, FeTi, FeW ve grafitin kimyasal analizleri Tablo 1’de, FeB, FeTi, FeW ve grafit tozlarının üç farklı karışım oranı da Tablo 2’de verilmiştir. FeB, FeTi, FeW ve grafit partikülleri ortalama ölçüleri 50 µm’ den küçüktür. Deney şartları Tablo 3’de verilmiştir.

Tablo 1. Takviye malzemelerin kimyasal analizi (%)

	Al	Ti	FeW	Si	%S	Fe	Cr	B	C	%P
FeB	0.5			2.5	0.05	Diğ.		18.1	0.5	0.025
FeTi	4	75		0.5	0.03	Diğ.				0.03
FeW			80	0.5		Diğ.	0.5			0.04
Grafit									99.9	

Tablo 2. Kaplama işlemi için kullanılan malzemelerin karışım oranları (%)

Numune No	FeB (%)	FeTi (%)	FeW(%)	C (%)
S 1	90	5	2	3
S 2	80	10	2	8
S 3	70	15	2	13

Tablo 3. Gaz tungsten kaynak yönteminin işlem parametreleri

Akım	120-140 A
Kaynak hızı	10 cm/dak.
Koruyucu gaz	Ar-99.9%
Koruyucu gaz akış hızı	14 l/dak
Ergimeyen elektrot	W-2%Th
Elektrot çapı	2.4 mm

Ergimeyen elektrot olarak %2 ThO₂ tungsten ve 11 mm çapında nozul kullanılmıştır. İşlem sırasında Argon koruyucu gaz olarak kullanılmıştır. Numunelerin metalografik inceleme için 10x10x10 mm boyutlarında numuneler hazırlanmış ve numunelerin yüzeyleri 1500 meshe kadar zımpara ile temizlenmiş ve 1 µm elmas pasta ile parlatılmıştır. Bu işleminden sonra numuneler 100 ml HCl, 1 gr pikrik asit ve 100 ml etil alkol karışımı ile dağlanmıştır. Dağlanan numunelerin optik mikroskop ile mikroyapı ve taramalı elektron mikroskopu (SEM) ile fotoğrafları çekilerek EDS analizleri alınmıştır. Kaplamaların mikrosertlikleri Lecia Q550 cihazı ile kaplama yüzeyinden başlayarak

geçiş bölgesine doğru 30 gr. yük ile mikrosertlikleri ölçülmüştür. Partiküllerin homojen bir karışımını elde edebilmek için bir mikser ile yaklaşık 1 saat karıştırılmıştır. Elde edilen karışım sodyum silikat (Na₂SiO₃) ile karıştırılarak macun haline getirilmiştir.

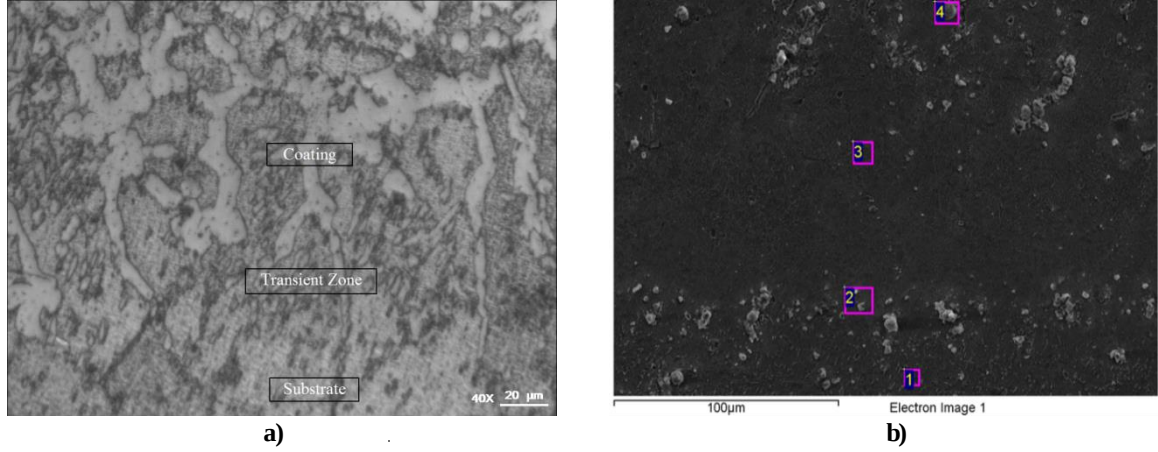
3. Bulgular ve Tartışma

3.1 Mikroyapı incelemeleri

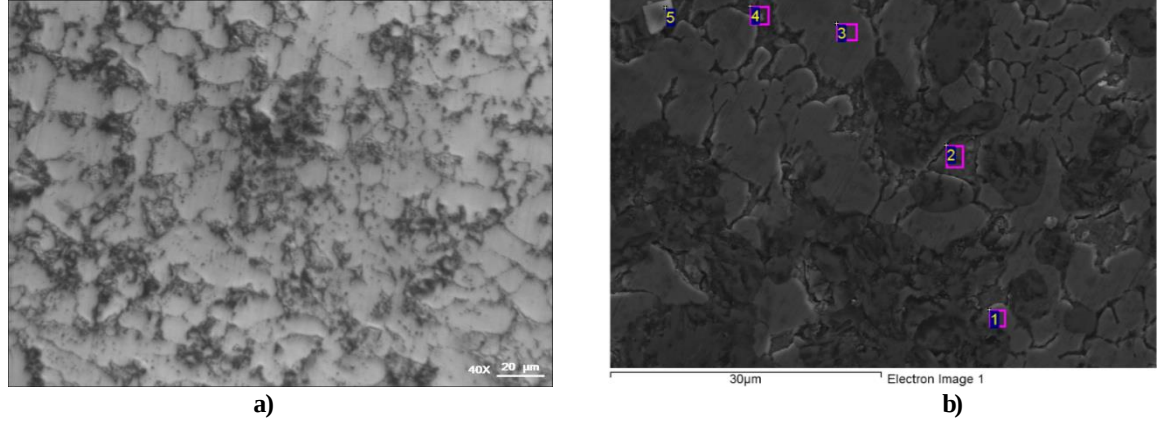
Kaplanmış yüzeylerde mikroyapıların kaplama boyunca homojen olmadığı görülmüştür. Kaplanmış yüzey alanı şekil 1a’da gösterilen S1 numunesinin optik mikroyapı ve şekil 1b’de gösterilen SEM fotoğrafında görülen altlık, geçiş ve kaplama bölgesi olarak üç bölgeye ayrılabilir. Kaplama bölgesinde bor, karbon, titanyum üç numunede tablo 2’de verilen oranlar kullanılmış, yapıda bor ve karbon birlikte kullanılarak borür ve karbürlerin kesit boyunca dağılımları incelenmiştir. Altlık malzemesinin hemen yanındaki geçiş bölgesi sorbitik perlit

adalı ötektik bir yapıdan oluşan ötektik üstü bir mikroyapıda oluşmuştur [15, 16]. Kaplama bölgesinde karbür ve borürlerden oluşan bir doku olduğu ve bu bölgeden, dış yüzeyden altlık malzemesine doğru kesit incelendiğinde kare ve üçgen şekilli TiC ve Ti_2B borürünün oranı artmıştır. Mikroyapıda, ötektik matriks içinde üçgen ve kare fiziksel şekilli titanyum borürlerinin olduğu gözlenmiştir. EDS analizlerine göre, birinci bölgede bor içerikli Fe_3

(BC)' karbürlere sahip ötektik bir yapı tespit edilmiştir (Şekil 1b). Ayrıca, analizler ikinci bölgedeki sert fazın Fe_7C_3 (Şekil. 1b) ve üçüncü bölgedeki fazların ise borür ve karbürden oluşan " Fe_2B+TiB_2 " bir yapı olduğunu işaret etmektedir. Şekil 1b'de gösterilen bölgelerden alınan EDS analizlerinin sonuçları Tablo 4'de verilmiştir. Yapıda sert fazlar demir karbür ve borürlerden ibarettir.



Şekil 1. S1 geçiş bölgesindeki mikroyapı fotoğrafları; a) OM, b) SEM



Şekil 2. S1 kaplamanın orta bölgelerindeki mikroyapı fotoğrafları; a) Optik, b) SEM

Tablo 4. Şekil. 1b'de SEM mikroyapı S1'in geçiş bölgesi EDS analiz sonuçları

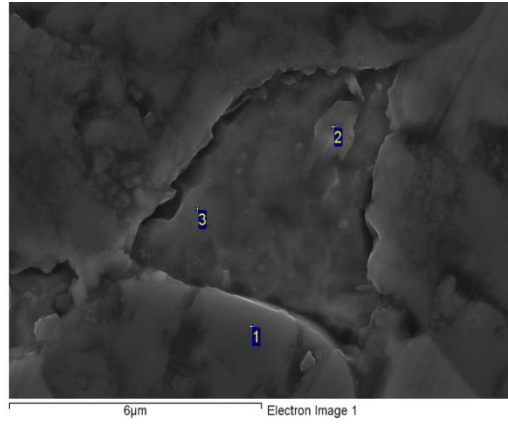
	Elementler %									
	B	C	Al	Si	Mn	Fe	Ti	W	Cu	O
1.Nokta	0.69	7.15		0.29	0.74	84.00	--	0.07	1.91	5.15
2.Nokta	0.63	6.39		0.30	0.67	86.84		0.14	2.06	2.97
3.Nokta	-	6.58	0.26	0.26	0.62	82.91	0.75	0.21	2.55	5.86
4.Nokta	1.12	10.87	0.29	0.21	0.67	64.86	1.83	0.29	1.22	18.49

Tablo 5’de kaplama bölgesinin orta kısımları incelenmiş, yapıda titanyum karbürler ve titanyum borürler olduğu tespit edilmiştir. EDS

analizleri bor ve karbon elementleri ile birlikte değerlendirildiğinde yapıda TiC, Ti₂B, Fe₅C₂ ve Fe₂B sert fazların varlığı belirlenmiştir.

Tablo 5. Şekil. 2b’de SEM S1’in orta bölgesi EDS analiz sonuçları

	Elementler %								
	B	C	Si	Al	Mn	Fe	Ti	W	O
1.Nokta	4.28	8.56	0.24	0.97	0.38	55.29	20.73	1.58	7.49
2.Nokta	1.02	4.77	0.84	1.36	0.47	73.86	15.29	1.98	--
3.Nokta	2.04	5.00	0.88	0.73	--	60.36	29.03	1.96	--
4.Nokta	--	2.32	1.91	0.83	--	67.87	24.10	2.98	--
5.Nokta	--	2.31	1.44	0.88	--	68.45	23.60	2.80	--



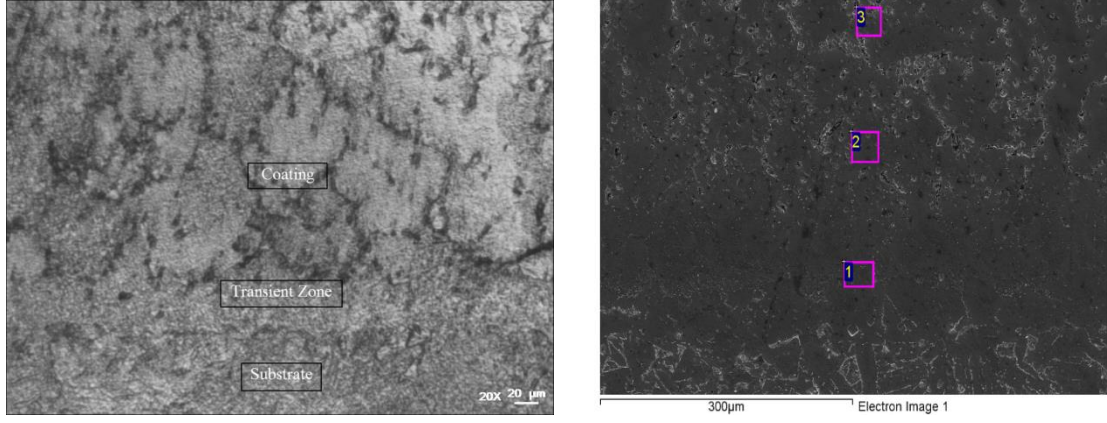
Şekil 3. Sıkı kaplamanın orta bölgelerindeki mikroyapısı SEM X10000

Tablo 6. Şekil 3’de (X10000) S1’in orta bölgesindeki EDS analiz sonuçları

	Elementler %							
	B	C	Si	Al	Mn	Fe	Ti	W
1.Nokta	--	4.51	0.82	1.41	0.47	76.40	13.90	1.97
2.Nokta	--	4.14	1.00	1.25	--	73.90	17.09	2.10
3.Nokta	1.52	4.02	0.98	1.24	--	82.91	18.57	2.42

S1 numunesinin orta bölgelerinde alınan mikroyapı şekil 3’de gösterilmiştir. TiC’lerin varlığı Tablo 6’da gösterilen EDS analizlerinden anlaşılmaktadır. Benzer mikroyapı fotoğrafları S1 ve S2’de görülmüştür. Üç farklı mikroyapı bölgesi görülmektedir. Geçiş bölgesine yakın ötektik yapı katıdır, fakat kare ve üçgen şekilli TiC’lerin yoğunluğu kaplamanın yüzeyine doğru artmaktadır (Şekil 4a,b). Analizlerden sert

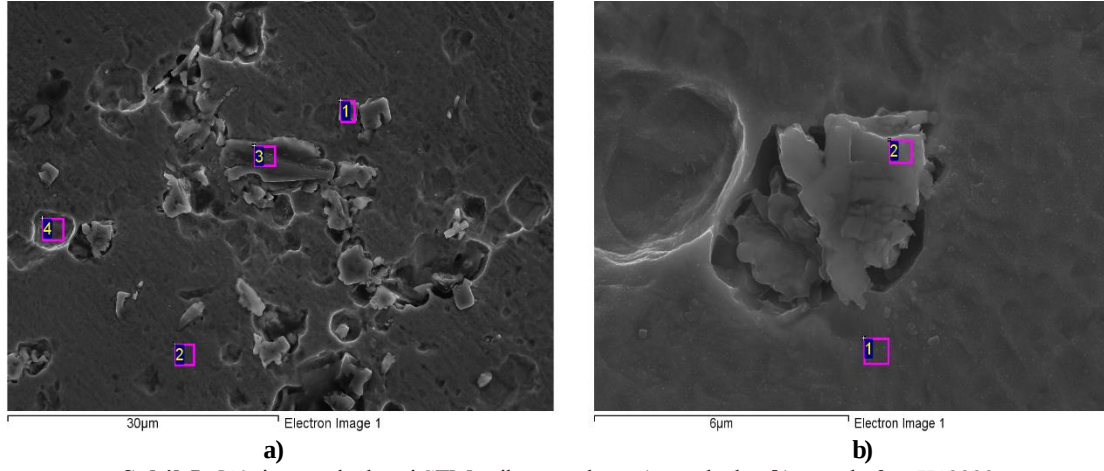
fazların TiC ve Fe₅C₂ olduğu varsayılabilir ve S2’de geçiş bölgesinin yapısı bir ötektik faz karışımı yapısıdır (Şekil. 4). EDS analizlerinden altlık malzemeye Ti ve C atomlarının difüze ettiği görülebilir (Tablo 7). İkinci bölgeden alınan mikroyapılar şekil 5 ve EDS analizleri de tablo 8’de verilmiştir. Bu bölgede Fe₂B boridlerin kümeleştiğini söylemek mümkündür.



a) b)
Şekil 4. S2'nin kaplama geçiş bölgelerindeki mikroyapıları; a) optik, b) SEM.

Tablo 7. Şekil 4b'de verilen mikroyapı S2 numunesinin geçiş bölgesi EDS analizleri

	Elementler %								
	B	C	Si	Mn	Fe	Ti	O	W	Cu
1. Nokta	--	2.84	0.25	0.59	90.10	0.68	3.10	--	2.45
2. Nokta	--	2.49	0.42	0.64	92.33	1.31	--	--	2.82
3. Nokta	--	6.76	0.27	0.53	80.12	7.72	--	2.40	2.20



a) b)
Şekil 5. S2'nin orta bölgesi SEM mikroyapıları a)orta bölge b) orta bölge X10000

Tablo 8. Şekil 5a'da mikroyapının S2'nin EDS analizleri

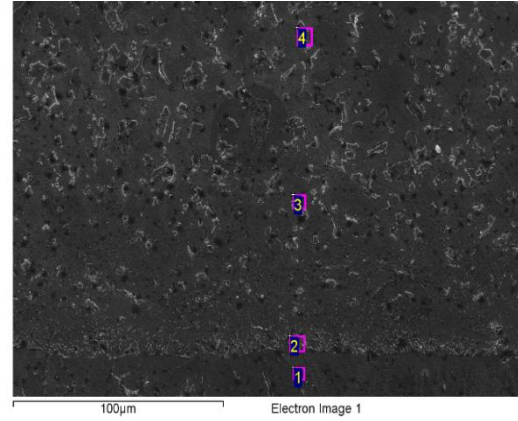
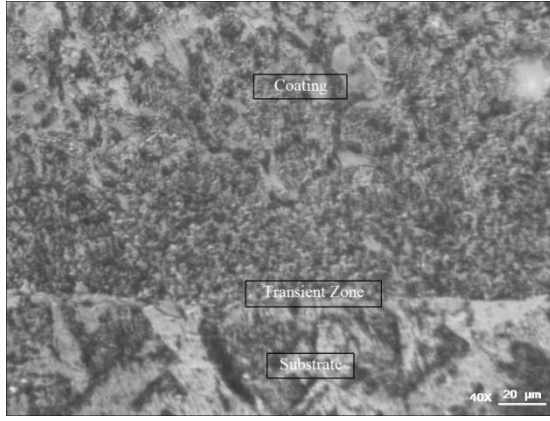
	Elementler %							
	B	C	Si	Mn	Fe	Ti	W	Cu
1.Nokta	--	1.95	0.43	0.56	92.98	0.93	0.75	2.40
2.Nokta	19.09	--	0.15	0.51	64.66	11.34	2.52	1.72
3.Nokta	--	1.94	0.40	0.58	92.75	1.19	0.80	2.34
4.Nokta	--	1.74	0.43	0.68	92.88	1.01	0.94	2.34

Tablo 9. Şekil 5b’de S2’nin mikroyapı EDS analizleri

	Elementler %							
	B	C	Si	Mn	Fe	Ti	W	Cu
1.Nokta	8.24	31.52	0.11	0.31	50.30	6.47	2.01	1.04
2.Nokta	1.03	5.26	0.12	0.53	67.24	18.90	5.47	1.46

S3 numunesindeki Fe_5C_2 , B_4C , FeB , TiC , sert faz karışımlarının mikroyapı fotoğrafları şekil 6’da, EDS analiz sonuçları tablo 7’de, matriks ve borid tabakalarının ara yüzeyindeki S2’nin mikroyapısı şekil 7a’da verilmiştir. Yüksek sıcaklıkta tane sınırları boyunca ötektik

karışımın sıvı alaşımı ergittiği görülmüştür. Yüksek sıcaklıktan hızlı soğuma sırasında bu erginemiş bölgeler ve ötektik içerisinde adacıklar oluşmuştur [19]. Öte taraftan kaplamanın ortasında ötektik bir mikroyapı görülmektedir (Şekil.7b).



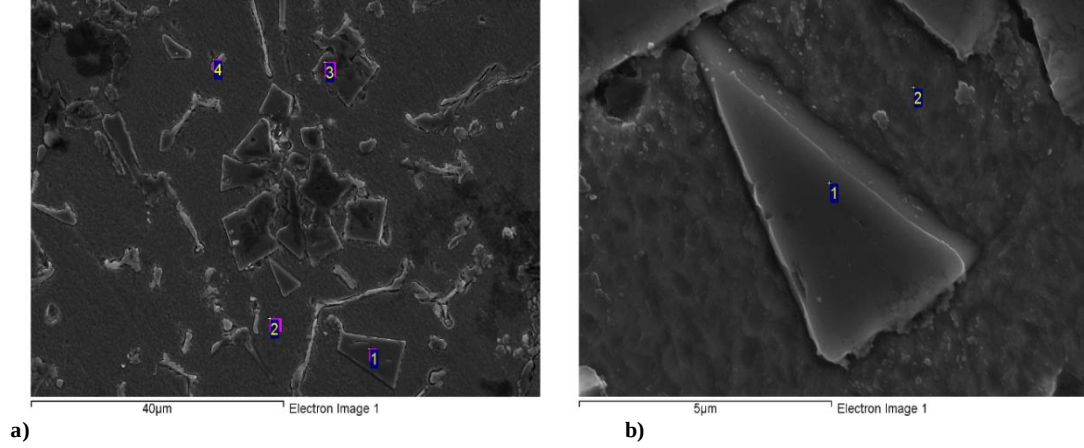
a) Şekil 6. S3’ün geçiş bölgesinin mikroyapıları a) Optik, b) SEM

S3’ün merkezinden alınan EDS analizleri ve mikroyapıları ötektik yapıyı desteklemektedir (Şekil 7a). 1. noktadan alınan EDS analizli C atomunun altlık malzemeye difüze ettiği, ancak B ve Ti atomunun difüze etmediği görülmektedir (Şekil 7b). Bor atom yoğunluğunun altlık

malzemesinden kaplamanın ortasına doğru arttığı görülmektedir. Buna ek olarak karbon yoğunluğu yüzeye doğru dengeli bir dağılım göstermekte, Ti yoğunluğu kaplama ortasından yüzeye doğru arttığı tespit edilmiştir (Tablo10).

Tablo 10. Şekil 6b’de S3’ün geçiş bölgesinden mikroyapı EDS analizleri

	Elementler %								
	B	C	Si	Al	Mn	Fe	Ti	W	Cu
1.Nokta	--	2.85	0.37	--	0.73	94.82	--	--	1.22
2.Nokta	--	3.59	0.50	0.40	0.54	92.49	0.40	0.85	1.24
3.Nokta	--	3.10	0.62	0.43	0.63	90.74	1.33	1.32	1.47
4.Nokta	--	3.12	0.72	0.40	0.70	89.69	1.97	--	3.03



Şekil 7. SEM mikroyapı S3; a) orta bölge b) X12000 büyütme

Tablo 11. Şekil 7a'da S3'ün mikroyapı EDS analizleri

	Elementler %							
	B	C	Si	Al	Mn	Fe	Ti	W
1. Nokta	3.18	18.02	0.26		0.81	23.62	38.26	16.92
2. Nokta	--	4.48	0.54	0.49	0.54	87.14	3.98	2.49
3. Nokta	21.05	9.07	0.05	0.22	--	40.50	21.84	6.92
4. Nokta	--	6.84	0.47	0.43	--	75.74	10.93	5.18

Tablo12. Şekil 7b'de S3'ün mikroyapı (X12000) EDS analizleri

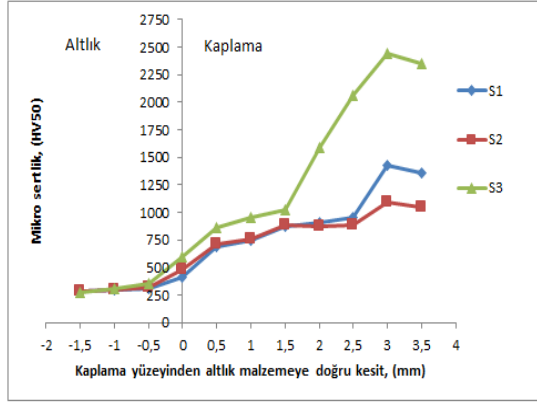
	Elementler %							
	B	C	Si	Al	Mn	Fe	Ti	W
1. Nokta		2.48	0.51	0.53	0.38	87.79	5.77	2.53
2. Nokta	0.14	13.03	0.19	0.37	0.40	55.73	22.64	7.49

Matriks ve borür tabakalarının ara yüzündeki S3'ün mikroyapısı şekil 7a'da verilmiştir. Yüksek sıcaklıkta tane sınırları boyunca ötektik karışımın sıvı alaşımı ergittiği görülmüştür. [19]. Öte taraftan kaplamanın ortasından alınan mikroyapıda üçgen şekilli TiC görülmektedir (Şekil7b).

3.2 Mikrosertlik

3 mm kaplama yüzeyinden 3500 µm derinliğinde 0.5 mm aralıklarla ölçülen mikrosertlik değerleri şekil 8'de verilmiştir. S1'in sertlik değeri 688 ile 1354HV arasında değişmektedir. S2'nin sertlik değeri 710 ile 1045 HV arasında olup S1'e göre zıt değerler çıkmıştır. S3'ün sertlik değeri 860 ile 2440 HV arasındadır. En düşük değer şekil 8'de görüldüğü gibi S2'de görülmüş olup, en yüksek değer S3'de

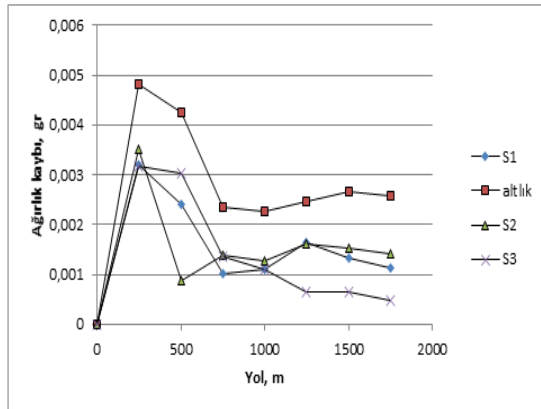
ölçülmüştür. Sertlik değerinin bu numunede görülmesi içerdiği sert karbürlere bağlanmıştır. Kaplamalar sertlik değerleri ile karşılaştırıldığında, geçiş bölgesindeki düşük sertlik değeri bor oranının azalması şeklinde değerlendirilebilir. Geçiş bölgesindeki düşük bor, titanyum ve tungsten, kaplama bölgesindeki fazlar ile karşılaştırıldığında yumuşak fazlar elde edilmiştir. Geçiş bölgesindeki azalma borid tabakasının altlık malzemesine iyi difüze olması şeklinde değerlendirilebilir [13, 20]. Altlık malzemesinin ısıdan etkilenen bölgedeki sertlik değeri 270 ile 350 HV arasında değişmekte, altlık malzemesine doğru yaklaştıkça 265 HV'ye kadar düştüğü görülmektedir. [13].



Şekil 8. Mikrosertlik

3.3. Aşınma

Numunelerin aşınma değerleri 170 N yük ile kütle kaybı olarak araştırılmış (Şekil 9) ve, kütle kaybının 500 metreye kadar yükseldiği görülmekte, aşınma mesafesinin artmasıyla birlikte ters orantılı olarak kütle kaybının azaldığı görülmektedir. En az aşınma miktarı S3'de görüldüğü, FeB, FeTi, FeW ve C ile bu elementlerin oluşturduğu çok sayıda bor, titanyum, wolfram ve karbona bağlı karbürlerin oluşması gösterilebilir. Sonuç olarak üç numunedeki aşınma miktarı 500 m mesafeden sonra grafit tabakaların varlığı sebebiyle kademeli olarak azaldığı tespit edilmiştir.



Şekil 9. Adhesiv aşınma grafiği

4. Genel Sonuçlar

Ana reaksiyon FeB-FeTi-FeW-C tozların TIG kaynak işlemi sırasında FeB, FeTi, FeW, C arasında oluşmuştur. Bu elementler arasındaki

reaksiyon geçiş bölgesinde sınırlı olduğu görülmüştür.

TiB₂, Fe₂B, WB₄, Ti₃B₄, B₂W, B₈C, TiB₁₂, FeWB, WB, Fe₇C₃, Fe₃W₃C, fazlarının kaplama yüzeyinde meydana gelmiştir. S2'de ise WB₄, WB, Fe₇C₃, Fe₃W₃C fazları görülmüştür. S3'de, WB₄, Ti₃B₄, B₈C, TiB₁₂, FeWB, WB, Fe₇C₃, Fe₃W₃C fazlarına ilave olarak Fe₅C₂, B₄C, FeB, TiC, B₁₃C₂, Fe₂C fazları tespit edilmiştir. FeW oranının her üç numunede oransal olarak sabit olmasına rağmen önemli wolfram karbürleri oluştuğu gözlenmiştir.

Bu sonuçlara göre, GTAW yöntemi ile elde edilen yüzey kaplamada kullanılan alaşım elementlerinin grafit ile birlikte çeliğinin aşınma direncini iyileştirebileceği sonucuna varılabilir [24]. Karbon oranının %3'den %13'e kadar artarak grafit tabakalarının oluşumuna neden olduğu ve kütle kaybı gittikçe azalmıştır. Bu çalışmada, adhesiv aşınma testi sonuçlarına göre, en az kütle kaybı S3'de görülmüştür. Yüksek oranlarda FeB, FeTi, FeW ve C ile bu elementlerin oluşturduğu bor, titanyum, wolfram ve karbona bağlı olarak karbürlerin oluşumu gösterilebilir.

Teşekkür

Yazarlar Fırat Üniversitesi Bilimsel Proje Araştırmaları birimine desteklerinden dolayı teşekkür eder. Bu çalışma FÜBAP (Proje No:1809) tarafından desteklenmiştir

5. Kaynaklar

1. Buytoz, S., Ulutan, M. and Yildirim, M.M. (2005). "Dry sliding wear behavior of TIG welding clad WC composite coatings", *Applied Surface Science*, 252 (Iss. 5): 1313-1323.
2. Gemelli, E., Gallerie, A., Kopp, F.C.T. and Camargo, N.H.A. (2005). "Improved surface properties of D2 steel by laser surface alloying", *Journal of Materials Science*, 40, 5649-5653.
3. Pashby, I.R., Barnes, S. and Bryden, B.G. (2003). "Surface hardening of steel using a high power diode laser", *Journal of Materials Processing Technology*, 139: 585-588.
4. Yildirim, M.M., Buytoz, S. and Ulutan, M. (2007). "Microstructural Changes to SiC Coated Metallic Surfaces Produced by the TIG Welding Process on a 45Mn5 Steel", *Prakt. Metallogr.*, 44 (2): 59-69.

5. Wu, X. and Chen, G. (1999). "Nonequilibrium microstructures and their evolution in a Fe–Cr–W–Ni–C laser clad coating", *Materials Science and Engineering*, **A270**: 183–189.
6. Khedkar, J., Khanna, A.S. and Gupta, K.M. (1997). "Tribological behaviour of plasma and laser coated steels", *Wear*, **205**: 220–227.
7. Korkut, M.H., Yılmaz, O. and Buytoz, S. (2002). "Effect of aging on the microstructure and toughness of the interface zone of a gas tungsten arc (GTA) synthesized Fe–Cr–Si–Mo–C coated low carbon steel", *Surface and Coatings Technology*, **157**: 5–13.
8. Yılmaz, S.O. (2005). Wear behavior of gas tungsten arc deposited FeCrC, FeCrSi, and WCo coatings on AISI-1018 steel, *Surface and Coatings Technology*, **194**, 175–83.
9. Matijević, B. and Stupnišek, M. (2009). Novelty in diffusion coating technology, *Materials and Manufacturing Processes*, **24**: 887–893.
10. Fujita, H. and Arai, T. (1985). Carbide coatings in molten Borax bath- growth mechanism of layer, Properties and Application, *Proceedings of the 4th Int. Congress of IFHT*. Berlin, 1109–1124.
- 11.. Ma, Z.Y. and Tjong, L. (2000). Gen. In-situ Ti–TiB metal–matrix composite prepared by a reactive pressing process, *Scripta Materialia*; **42(4)**: 367–373.
12. Yılmaz, S.O., Ozenbas, M. and Yaz, M. (2009). Synthesis of TiB₂-reinforced iron-based composite, Coating, *Tribology International*, **42**: 1220–1229.
13. Bourithis, L., Papaefthymiou, S. and Papadimitriou, G. D. (2002). Plasma transferred arc boriding of a low carbon steel: microstructure and wear properties, *Applied Surface Science*, **200(1-4)**, 203–218.
14. Darabara, M., Papadimitriou, G.D. and Bourithis, L. (2006). Production of Fe–B–TiB₂ metal matrix composites on steel surface, *Surface & Coatings Technology*, **201**: 3518–3523.
15. Buchely, M.F., Gutierrez, J.C., Leon, L.M. and Toro, A. (2005). The effect of microstructure on abrasive wear of hardfacing alloys, *Wear*, **259**: 52–61.
16. Berns, H. (1995). Microstructural properties of wear resistant alloys, *Wear*, **181**: 271–279.
17. Kirchgaßner, M., Badisch, E. and Franek, F. (2008). Behaviour of iron-based hardfacing alloys under abrasion and impact, *Wear*, **265**: 772–779.
18. Xiaolei, W. and Guanguan, C. (1999). Material Science and Engineering, **270**, 183.
19. Zhang, L., Liu, B., Yu, H. and Sun, D. (2007). Rapidly solidified non-equilibrium microstructure and phase transformation of plasma cladding Fe-based alloy coating. *Surface & Coatings Technology*, **201**: 5931–5936.
20. Eroglu, M. (2009). Boride coatings on steel using shielded metal arc welding electrode: Microstructure and hardness. *Surface & Coatings Technology*, **203**: 2229–2235.
21. Kulka, M., Makuch, N., Dziarski, P., Piasecki, A. and Miklaszewski, A. (2014). Microstructure and properties of laser-borided composite layers formed on commercially pure titanium. *Opt. Laser Technol.*, **56**: 409–424.
22. Li, G.J., Li, J. and Luo, X. (2015). Effects of post-heat treatment on microstructure and properties of laser clad composite coatings on titanium alloy substrate. *Opt. Laser Technol.*, **65**: 66–75.
23. Laird, G., Gundlach, R. and Rohrig, K. (2000). Abrasion-resistant cast iron handbook. *Illinois: American Foundry Society*, p. 72.
24. Yaz, M. (2013). In situ formation of square shaped Fe₂B borides in coated surface produced by GTAW, *JOAM*, **15**: 1037 – 1046.

Membran Sentezinde Koagülasyon Banyosunun ve Polivinil Prolidon Eklenmesinin Tıkanma Üzerine Etkileri

Evrin Çelik Madenli^{1*}, Özgür Çakmakçı^{1,2}, Kemal Aktaş^{1,3}, Ulaş Aygör¹

¹ Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Isparta

² Muş Alparslan Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Muş

³ Akdeniz Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Antalya

* evrimcelik@sdu.edu.tr

(Geliş/Received: 16.05.2017 ; Kabul/Accepted: 06.07.2017)

Özet

Membran teknolojisi hızlı, enerji etkili ve faz değişimi gerektirmediği için ayırmada alternatif ve cazip bir metottur. Fakat, membran teknolojisindeki en büyük problem çok ciddi akı kaybının olduğu membran tıkanmasıdır. Polieter sülfon membranlar polivinil pirolidon gibi hidrofilik katkı maddeleriyle karıştırılarak hidrofilikliği artırılabilir. Ayrıca koagülasyon ortamının değiştirilmesi ile membranların gözeneklilikleri artırılabilir. Gözenekliliği artan membranlar daha yüksek akıda filtrasyon gerçekleştirerek arıtma maliyetini düşürür. Bu bilgiler ışığında farklı molekül ağırlıklarında polivinilden pirolidon katkılı mikrofiltrasyon membranları farklı tuz içerikli koagülasyon banyolarında sentezlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre PVP360 katkılı membranlar PVP10 katkılı membranlara göre daha gözenekli ve hidrofiliktir. Tıkanma dirençleri karşılaştırıldığı zaman ise PVP360 katkılı membranlar PVP10 katkılı membranlara göre daha düşük tıkanma ve daha yüksek akı geri dönüşümü göstermiştir. Ayrıca, koagülasyon banyosunda NaCl veya Na₂CO₃ kullanılarak sentezlenen membranlar incelendiğinde hem PVP10 hem de PVP360 katkılı membranların tıkanma oranlarının azaldığı ve akı geri dönüşümlerinin arttığı görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Membran sentezi, Polietersülfon, Polivinil pirolidon, Tıkanma.

Fouling Effects of the Coagulation Bath and Polyvinylpyrrolidinone Addition During Membrane Synthesis

Abstract

Membrane technology is an attractive and alternative method for separation due to its high speed, energy efficiency and phase change unnecessary. However, membrane fouling with high flux loss is the biggest problem of membrane technology. Hydrophilicity of polyethersulfone membranes can be increased by doping hydrophilic materials like polyvinylpyrrolidone. In addition, membrane porosity can be increased by changing the coagulation medium. Filtration cost might be reduced by more porous membranes due to their increased filtration flux. Taking in the consideration of these information, polyvinylpyrrolidone with different molecular weight doped polyethersulfone microfiltration membranes were synthesised in coagulation baths with different salt compositions. The results obtained showed that PVP360 doped membranes are more porous and hydrophilic than PVP10 doped membranes. According to the fouling resistance comparison PVP360 doped membranes has a lower fouling and higher flux recovery ratio than PVP10 doped membranes. In addition, synthesis of both PVP10 and PVP360 doped membranes in the coagulation medium of NaCl or Na₂CO₃ reduce the fouling and increases the flux recovery ratio.

Keywords: Fouling, Membrane synthesis, Polyethersulfone, Polyvinylpyrrolidone.

1. Giriş

Membran teknolojisi hızlı, enerji etkili ve faz değişimi gerektirmediği için ayırmada alternatif ve cazip bir metottur [1]. Membranlara

dayalı ayırma teknolojilerinde, filtrasyon sisteminin, kullanılan membranın vb. optimizasyonu iyi yapıldığı takdirde enerji ihtiyacı ve maliyet düşüktür. Küçük ve orta gözenekli membranlar, iyi termal, kimyasal ve

mekanik stabilitesi nedeni ile ilgi çekmektedir [2]. Ultrafiltrasyon ve mikrofiltrasyon gibi gözenekli membranlar daha az alan gerektirmesi, daha düşük basınç gereksinimi gibi işletimsel avantajlar sunmaktadır [3]. Membranların yüksek ayırma verimleri nedeni ile ayırma, konsantre hale getirme ve saflaştırma endüstriyel olarak uygulanabilir hale gelmiştir. Ek olarak, membranların küçük alan gereksinimleri, işlemin kolaylığı ayırma proseslerinde uygulanmalarını arttırmıştır [4]. Günümüzde, ultrafiltrasyon membranları ilaç, kağıt, yarı iletken ve süt ürünleri endüstrilerinde yaygın olarak kullanılmaktadır [1].

İyi film oluşturabilmeleri, esneklikleri, sertlikleri, ayırma özellikleri ve düşük maliyetleri nedeni ile polimerik membranlar membran uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır [5]. Polieter sülfon, polisülfona göre mükemmel kimyasal direnci, termal istikrarı ve mekanik özellikleri nedeni ile membran malzemesi olarak kullanılmaktadır [1]. Makromoleküller polimerik membranların hidrofobik doğası nedeni ile kolayca tutunarak birikmektedir [6]. Membran hidrofiliği artırılarak bu birikme azaltılabilir [7]. Organik membranların hidrofiliğini artırmak için çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmalar üç ana başlığa ayrılabilir: (1) hidrofilik maddelerle karıştırılması, (2) hidrofilik polimer, monomer veya fonksiyonel gruplarla aşılması, (3) hidrofilik polimerlerle kaplanması [8].

Polieter sülfon membranlar polivinil pirolidon gibi hidrofilik katkı maddeleriyle karıştırılarak hidrofiliği artırılabilir. Ayrıca koagülasyon ortamının değiştirilmesi ile membranların gözeneklilikleri artırılabilir. Gözenekliliği artan membranlar daha yüksek akıda filtrasyon gerçekleştirerek arıtma maliyetini düşürür.

2. Materyal ve Metot

2.1. Materyal

Bu çalışmada kullanılan polietersülfon (PES) Solvay Advanced Polymers (Belçika) firması tarafından sağlanmıştır. Polivinil pirolidon (PVP) (10 ve 360 kDa) ve 1-Methyl-2-pyrrolidinone (NMP) Sigma Aldrich (ABD)

firmasından, sodyum klorür (NaCl) ve sodyum karbonat (Na_2CO_3) ise Merck (ABD) firmasından alınmıştır. Ayrıca molekül ağırlığı ~66 kDa olan Bovin serum albumin (BSA) Fluka (ABD) firmasından temin edilmiştir.

2.2. Membran sentezi

Membran sentezinde % 15 PES, %80 NMP içerisinde çözüldükten sonra %5 oranında PVP10 veya PVP360 eklenmiştir. Daha sonra hazırlanan membran çözeltisi hava kabarcıklarının çıkması için 3 gün boyunca bekletilmiştir. Hava kabarcıkları çıkartılan membran çözeltisi Sheen marka otomatik film aplikatör ile cam plaka üzerine 200 μm kalınlıkta dökülmüştür. Cam plakaya dökülen membranlar hızla su, %5 NaCl veya %5 Na_2CO_3 çözeltilerinden oluşturulan su banyolarına alınarak faz ayırma yöntemi ile membranlar hazırlanmıştır. Sentezlenen membranlar saf su ile yıkandıktan sonra kullanılıncaya kadar saf su içerisinde 4°C’de saklanmıştır.

Membranların karşılaştırılmasında kolaylık olması için membran isimlerinde kısaltma yapılmıştır. Membranların hangi şartlarda, hangi koagülasyon ortamı içerisinde hazırlandığı ve yapılan kısıtlamaya göre isimlendirme Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Membran sentez şartları

Membranın adı	Katkı maddesi	Koagülasyon banyosu
PES-P10/S	PVP 10 kDa	H ₂ O
PES-P10/SK1	PVP 10 kDa	%5 NaCl
PES-P10/SKa	PVP 10 kDa	%5 Na ₂ CO ₃
PES-P360/S	PVP 360 kDa	H ₂ O
PES-P360/SK1	PVP 360 kDa	%5 NaCl
PES-P360/SKa	PVP 360 kDa	%5 Na ₂ CO ₃

2.3. Karakterizasyon

Sentezlenen membranların gözeneklilikleri, yaş ve kuru ağırlıkları tartılarak hesaplanmıştır. İlk olarak saf su içerisinde muhafaza edilen membranlar 2×2 cm² ebatlarında kesildikten sonra üzerindeki fazla su alınarak tartılmıştır. Daha sonra 80°C sıcaklıkta 24 saat etüvde kurutularak tekrar tartılmışlardır. Yaş ve kuru ağırlıkları tartılan membranların gözeneklilikleri denklem (1)’e göre hesaplanmıştır [9]. Formüle göre gözeneklilik (G), yaş membran ağırlığı

(A_y), kuru membran ağırlığı (A_k), membran yüzey alanı (YA) ve membran kalınlığı (k) ile ifade edilmiştir.

$$G = \frac{A_y - A_k}{YA \times k} \times 1000 \quad (1)$$

Sentezlenen membranlarının hidrofilik mi yoksa hidrofobik mi özellik gösterdiğini tespit etmek için temas açısı ölçüm cihazı (OneAttention, Theta Lite, İsveç) kullanılmıştır. Temas açısı ölçümünde membran yüzeyine bir damla saf su damlatılmış ve düşen su damlasının yüzeyle yaptığı açıya bakılarak temas açısı ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Anlamlı sonuçlar elde etmek için membran yüzeyinde 7 farklı noktada yapılan ölçümlerin ortalamaları verilmiştir.

Membranların yüzey fonksiyonel gruplarını belirleyebilmek için Fourier kızılötesi dönüşüm spektrometresi (FTIR) (Perkin Elmer-Spectrum Two, ABD) kullanılmıştır. FTIR analizlerinde genel seyreltilmiş toplam yansıma (UATR) aparatı ile doğrudan ölçümler yapılmıştır.

2.4. Membran filtrasyon

Membran filtrasyonu deneylerinde dik filtrasyon ünitesi (Sterlitech, HP4750, ABD) kullanılmıştır. Kullanılan membran ünitesinin membran alanı 18.86 cm^2 'dir. Filtrasyon deneylerinde membranlar ilk olarak 2 saat süre ile 2 bar basınç altında sıkıştırma işlemine tabi tutulmuştur. Saf su filtrasyonu testleri sırasında membranların saf su akısı (J_{ss}), süzütünün belirli aralıklarla tartılması ile denklem (2) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$J = \frac{V}{A \Delta t} \quad (2)$$

Burada J akıyı ($\text{L/m}^2\text{s}$), V süzülen suyun hacmini (L), A membran alanını (m^2) ve Δt ise filtrasyon süresini (s) göstermektedir.

Membranların sıkıştırılması işleminden sonra tıkanma testleri için 1 saat süre ile 1 mg/mL BSA filtrasyonu 0.5 bar basınç altında gerçekleştirilmiştir. BSA filtrasyonu başlangıcındaki akı (J_{bp}) ve 1 saat filtrasyon sonundaki akı (J_{sp}) belirlenmiştir. BSA giderim verimleri ise denklem (3) kullanılarak hesaplanmıştır

$$R(\%) = \frac{C_f - C_p}{C_f} \times 100 \quad (3)$$

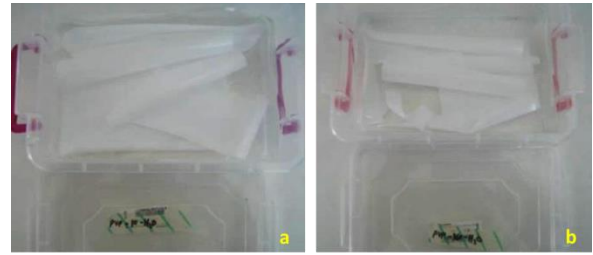
Burada R BSA giderim verimini (%), C_p ve C_f (mg/L) sırası ile 280 nm dalga boyunda

spektrofotometre ile ölçülen süzüntü ve besleme çözeltilerinin konsantrasyonunu göstermektedir. Son olarak membranlardan yarım saat boyunca 2 bar basınç altında saf su süzülerek temizlenmiş membran akısı (J_{tm}) belirlenerek membranların akı geri kazanım oranları (FRR) Denklem (4) kullanılarak belirlenmiştir.

$$FRR = \frac{J_{tm}}{J_{ss}} \times 100 \quad (4)$$

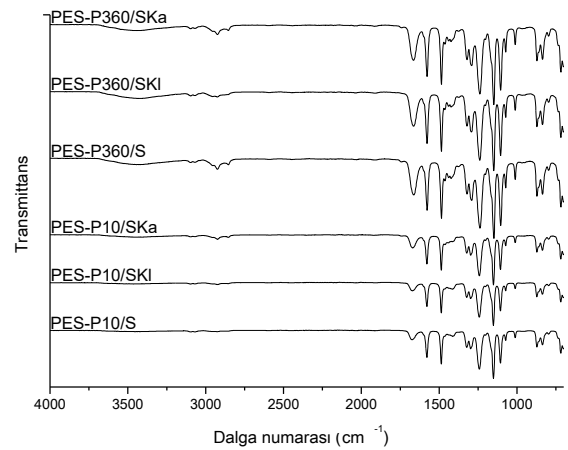
3. Bulgular ve Tartışma

Membranların genel görüntülerine örnek olması açısından saf su içerisinde sentezlenen PES-P10 ve PES-P360'nın fotoğrafları Şekil 1'de gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü üzere beyaz renkli standart PES membranlar başarı ile sentezlenmiştir.



Şekil 1. Sentezlenen membranlara ait görüntüler: a) PES-P10/S, b) PES-P360/S

Sentezlenen membranların FTIR spektrumları Şekil 2'de gösterilmiştir.

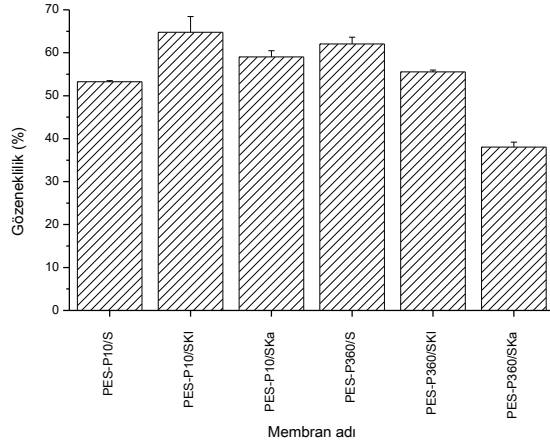


Şekil 2. Membranların FTIR spektrumları

Şekil 2'de gösterildiği gibi PVP10 katkılı membranların tamamı koagülasyon banyosu farkına bakmaksızın yaklaşık 1675 cm^{-1} dalga

numarasında, PVP360 katkıli membranların tamamı da koagülasyon banyosu farkına bakmaksızın yaklaşık 1665 cm⁻¹ dalga numarasında farklı birer pik göstermektedir. Bu yeni oluşan pikler PVP10 ve PVP360 katkıli membranların başarı ile sentezlenmiş olmasının göstergesidir. Ek olarak sentezlenen membranlarda koagülasyon banyosunun değiştirilmesi membranların FTIR spektrumlarında herhangi bir değişiklik göstermemiştir.

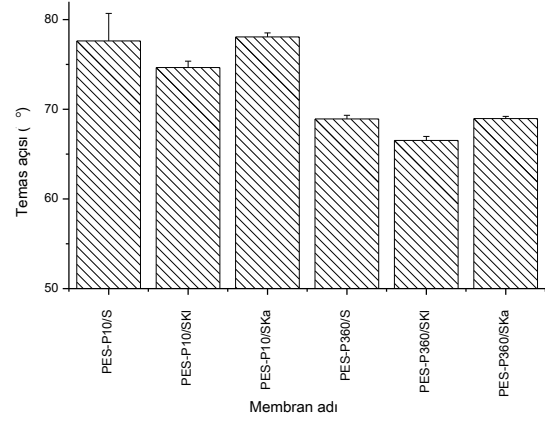
Sentezlenen membranların gözeneklilikleri yaş ve kuru ağırlıkları hesaplanarak membran gözeneklerinde bulunan suyun kütlesi dikkate alınarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 3'te verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere PVP360 eklenen membranların gözeneklilikleri PVP10 eklenen membranların gözenekliliklerinden daha büyüktür. Sadrzadeh ve Bhattacharjee [10] yaptıkları çalışmada membran sentezi sırasında eklenen PVP'nin molekül ağırlığının artırılmasının membran su tutma kapasitesini (membran gözenekliliği) arttırdığını göstermişlerdir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar Sadrzadeh ve Bhattacharjee [10] yaptıkları çalışma ile benzerlik göstermektedir. Fakat PVP10 eklenen membranlarda koagülasyon banyosu kompozisyonuna %5 tuz eklenmesi membran gözenekliliğini artırırken PVP 360 eklenen membranlarda koagülasyon banyosuna %5 tuz eklenmesi membran gözenekliliğini azaltmaktadır.



Şekil 3. Sentezlenen membranlara ait gözeneklilik değerleri

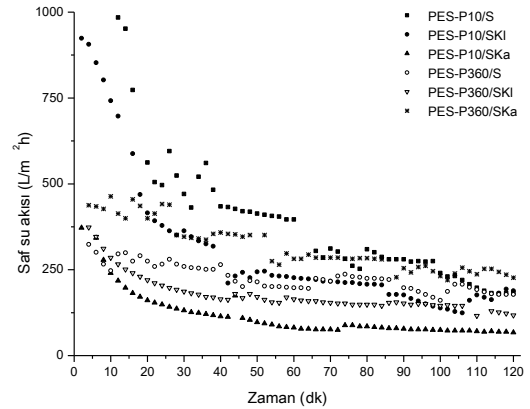
Kuru membranlar üzerinde su damlasının membran yüzeyi ile yaptığı açıyla hesaplanan

membranların su temas açıları Şekil 4'te verilmiştir. PVP360 eklenen membranların temas açısı PVP10 eklenen membranlara göre daha düşüktür. Temas açısındaki düşüş hidrofiliklik göstergesi olduğu için PVP360 katkıli membranlar PVP10 katkıli membranlardan daha hidrofiliktir. Sadrzadeh ve Bhattacharjee [10] yaptıkları çalışmada membran sentezi sırasında eklenen PVP'nin molekül ağırlığının artırılmasının membran hidrofilikliğini de arttırdığını göstermişlerdir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar da Sadrzadeh ve Bhattacharjee'nin [10] elde ettiği sonuçlarla benzerlik göstermektedir. Fakat koagülasyon banyosunun değiştirilmesi membran hidrofilikliğini etkilememektedir.



Şekil 4. Sentezlenen membranlara ait temas açısı değerleri

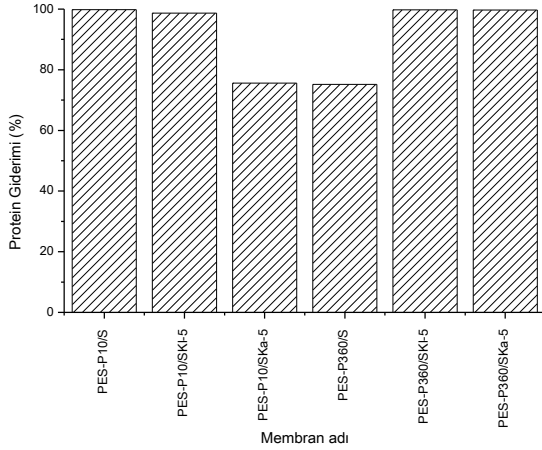
Membranların filtrasyon performanslarını incelemek için 2 saat süreyle saf su filtrasyonu yapılmış ve elde edilen sonuçlar Şekil 5'te gösterilmiştir.



Şekil 5. Membranların saf su akıları

Şekil 5'te gösterildiği gibi PVP10 ve PVP360 katkıli membranlar birbirine çok yakın akılar göstermiştir. Fakat PVP10 katkıli membranlarda koagülasyon banyosunda sodyum karbonat kullanılması saf su akısını azaltırken PVP360 katkıli membranlarda koagülasyon banyosunda sodyum karbonat kullanılması saf su akısının azalmasına neden olmuştur.

Membranların tıkanma dirençlerini belirlemek için BSA filtrasyonu ile tıkanma testleri gerçekleştirilmiştir. 1 saat süreyle BSA filtrasyonu sonucunda elde edilen BSA giderim verimleri Şekil 6'da gösterilmiştir. PVP360/S ve PVP10/SKa membranları dışındaki bütün membranlar neredeyse %100 protein giderimi sağlamıştır. Bu sonuçlara göre PVP360/S ve PVP10/SKa membranları dışındaki membranların BSA'nın molekül boyutu olan 66 kDa'dan daha küçük gözenek boyutuna sahip olduğu söylenebilir.

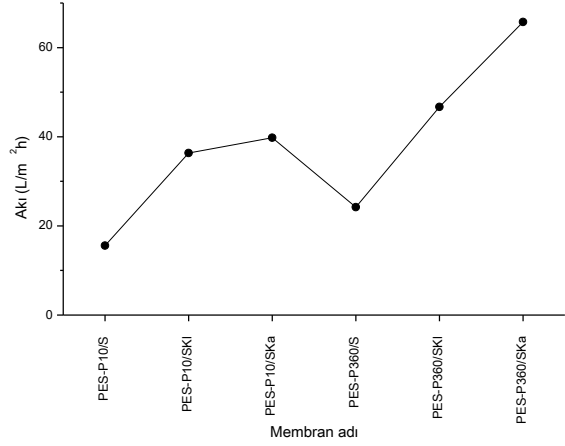


Şekil 6. Membranların protein giderim verimleri

Bir saatlik protein filtrasyonu sonunda elde edilen mutlak akılar Şekil 7'de verilmiştir. Bu verilere göre PVP360 katkıli membran PVP10 katkıli membrandan daha yüksek akı değerine sahiptir. Ayrıca, hem PVP360 katkıli hem de PVP10 katkıli membranlar için koagülasyon banyosuna tuz eklenmesinin protein filtrasyonu mutlak akısı üzerine pozitif bir etkisi mevcuttur.

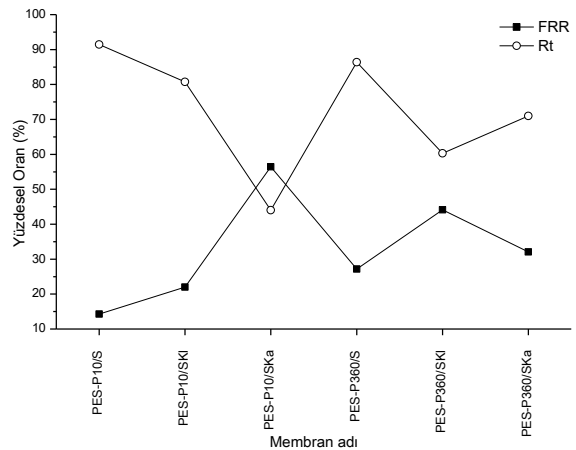
Toplam akı kaybı ve akı geri kazanım oranı Şekil 8'de verilmiştir. Toplam akı kaybı, toplam protein tıkanması olarak tanımlanabilir ve Denklem (5) kullanılarak hesaplanabilir [11];

$$R_t = \frac{J_{ss} - J_{sp}}{J_{ss}} \times 100 \quad (5)$$



Şekil 7. BSA filtrasyonu sırasında membranların mutlak akıları

PVP10 katkıli membranın toplam akı kaybı PVP360 katkıli membrandan daha yüksektir. Buna paralel olarak ta PVP10 katkıli membranların akı geri kazanım oranı PVP360 katkıli membrandan daha düşüktür. PVP10 katkıli membranlarda koagülasyon banyosuna tuz eklenmesi toplam akı kaybını azaltırken akı geri kazanım oranını da arttırmaktadır. Elde edilen bu sonuçlara göre PVP10 katkıli membranların tıkanma oranı çok yüksektir. Fakat bu tıkanma oranı membran sentezi sırasında koagülasyon banyosuna tuz eklenerek azaltılabilir. PVP10/SKa membranın protein giderim verimi de %75 civarında olduğu için (Şekil 6) bu membranın gözenek boyutu daha büyüktür. Dolayısı ile tıkanma oranının düşük olması beklenen bir sonuçtur.

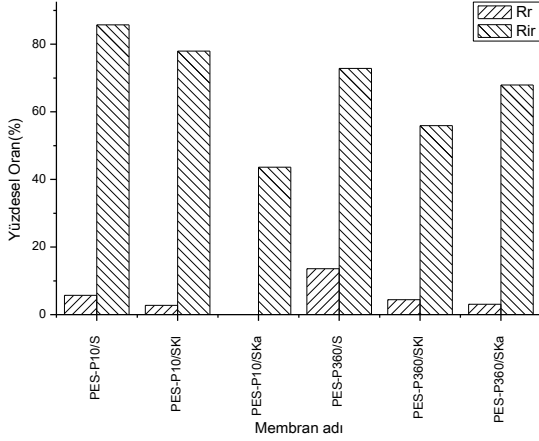


Şekil 8. BSA filtrasyonu sırasında akı değişimleri

Membranların tıkanma oranlarının daha kapsamlı araştırılabilmesi için membranların geri dönüşlü (Rr) ve geri dönüşsüz (Rir) tıkanma oranları sırası ile Denklem (6) ve (7) kullanılarak hesaplanmış ve Şekil 9’da gösterilmiştir.

$$R_r = \frac{J_{tm} - J_{sp}}{J_{ss}} \times 100 \quad (6)$$

$$R_{ir} = \frac{J_{ss} - J_{sp}}{J_{ss}} \times 100 \quad (7)$$



Şekil 9. Membranların tıkanma oranları

Şekil 9’a göre sentezlenen bütün membranlarda geri dönüşsüz tıkanma oranı geri dönüşümlü tıkanma oranına göre çok daha yüksektir. PVP10 katkılı membranın PVP360 katkılı membrana göre geri dönüşsüz tıkanma oranı daha yüksekken geri dönüşümlü tıkanma oranı daha düşüktür. Elde edilen bu sonuçlara göre PVP360 katkılı membranın PVP10 katkılı membrana göre daha az tıkanacak bir membran olduğunu söylemek mümkündür.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada polivinilden pirolidon katkısının ve koagülasyon banyosu kompozisyonunun polietersülfon membranlarının tıkanmaları üzerine etkileri araştırılmıştır. Bu hedefle PVP10 ve PVP360 katkılı membranlar su, %5 NaCl ve %5 Na2CO3 çözeltilerinden oluşturulan koagülasyon banyolarında sentezlenmiştir. Bu membranların tıkanma dirençlerinin belirlenebilmesi için de BSA filtrasyonu gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

PVP10 ve PVP360 katkılı membranlar su, %5 NaCl ve %5 Na2CO3 çözeltilerinden

oluşturulan koagülasyon banyolarında başarı ile sentezlenmiştir.

PVP10 katkılı membranlar 1675 cm-1 civarında ve PVP360 katkılı membranlar 1665 cm-1 civarında yeni pikler oluşturmıştır.

PVP360 katkılı membranlar PVP10 katkılı membranlara göre daha gözenekli ve daha hidrofiliktir.

PVP10 ve PVP360 katkılı membranlar benzer saf su akısı sağlamıştır. Ayrıca her iki membran da neredeyse %100 protein giderimi sağlamıştır.

PVP360 katkılı membranın PVP10 katkılı membrana göre mutlak protein filtrasyonu akısı daha yüksektir. Ayrıca, PVP360 katkılı membran daha az tıkanma ile birlikte daha yüksek akı geri dönüşümü sağlamıştır. Tıkanma oranları daha detaylı incelendiği zaman PVP360 katkılı membranın PVP10 katkılı membrana göre daha yüksek geri dönüşümlü ve daha düşük geri dönüşsüz tıkanma oranlarına sahip olduğu sonucuna varılmıştır.

Koagülasyon banyosunda %5 NaCl veya %5 Na2CO3 kullanılarak sentezlenen membranlar incelendiğinde ise hem PVP10 hem de PVP360 katkılı membranların tıkanma oranlarının azaltıldığı ve akı geri dönüşümlerinin arttığı görülmüştür.

5. Teşekkür

Bu çalışma SDU-3785 proje numarası ile Süleyman Demirel Üniversitesi tarafından desteklenmiştir. Ayrıca TÜBİTAK tarafından 2209 programı kapsamında kısmi destek sağlanmıştır.

6. Kaynaklar

1. Idris, A., Zain, N.M. and Noordin, M.Y. (2007). Synthesis, characterization and performance of asymmetric polyethersulfone (PES) ultrafiltration membranes with polyethylene glycol of different molecular weights as additives. *Desalination*, **207**: 324-339.
2. Choi, J.H., Jegal, J. and Kim, W.N. (2006). Fabrication and characterization of multi-walled carbon nanotubes/polymer blend membranes. *Journal of Membrane Science*, **284** (1-2): 406-415.
3. Choi, H., Zhang, K., Dionysiou, D.D., Oerther, D.B. and Sorial, G.A. (2005). Effect of permeate flux and tangential flow on membrane fouling for

wastewater treatment. *Separation and Purification Technology*, **45**: 68–78.

4. Arthanareeswaran, G., Thanikaivelan, P., Srinivasn, K., Mohan, D. and Rajendran, M. (2004). Synthesis, characterization and thermal studies on cellulose acetate membranes with additive. *European Polymer Journal*, **40** (9): 2153-2159.

5. Peng, F.B., Hu, C.L. and Jiang, Z.Y. (2007). Novel ploy(vinyl alcohol)/carbon nanotube hybrid membranes for pervaporation separation of benzene/cyclohexane mixtures. *Journal of Membrane Science*, **297** (1-2): 236-242.

6. Blanco, J.F., Sublet, J., Nguyen, Q.T. and Schaetzel, P. (2006). Formation and morphology studies of different polysulfones-based membranes made by wet phase inversion process. *Journal of Membrane Science*, **283** (1-2): 27-37.

7. Wang, Y.Q., Su, Y.L., Sun, Q., Ma, X.L. and Jiang, Z.Y. (2006). Generation of anti-biofouling ultrafiltration membrane surface by blending novel branched amphiphilic polymers with polyethersulfone. *Journal of Membrane Science*, **286** (1-2): 228-236.

8. Yang, Y., Zhang, H., Wang, P., Zheng, Q. and Li, J. (2007). The influence of nano-sized TiO₂ fillers on the morphologies and properties of PSF UF membrane. *Journal of Membrane Science*, **288**: 231–238.

9. Zheng, Q.Z., Wang, P., Yang, Y.N. and Cui, D.J. (2006). The relationship between porosity and kinetics parameter of membrane formation in PSF ultrafiltration membrane. *Journal of Membrane Science*, **286**: 7-11.

10. Sadrzadeh, M. and Bhattacharjee, S. (2013). Rational design of phase inversion membranes by tailoring thermodynamics and kinetics of casting solution using polymer additives. *Journal of Membrane Science*, **441**, 31-44.

11. Celik, E., Liu, L. and Choi, H. (2011). Protein fouling behavior of carbon nanotube/polyethersulfone composite membranes during water filtration. *Water Research*, **45**: 5287-5294.

Doğrusal Kanallara Yerleştirilen Üçgen Labirent Yan Savaklarda Kret Uzunluğu Değişiminin Debi Katsayısına Etkisi

Nihat KAYA

Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Elazığ
e-posta: nkaya@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 25.05.2017; Kabul/Accepted: 12.07.2017)

Özet

Yan savaklar; bir kanaldaki fazla debinin azaltılması veya herhangi bir kanaldan ihtiyaç olan debinin alınması için kullanılan bir hidrolik yapıdır. Bu çalışmada klasik yan savakların yerine labirent yan savaklar kullanılarak kret uzunluğunun farklı savaklama boyları ele alınmıştır. Çalışmanın asıl amacı, ince kenarlı labirent yan savaklarda kret uzunluğu değişiminin deşarj kapasitesine etkisini detaylı bir şekilde incelemektir. Deneyler doğrusal kanalda 25, 50, 75 cm savak genişliğine sahip, 12, 16, 20 cm kret yükseklikleri için tepe açısı 45° olan üçgen savakta yapılmıştır. Okumalar her bir kret yüksekliğinde savak memba kret uzunluğunu üç aşamalı kapatarak (kısaltılarak) alınmıştır. Deneyler de debi değişimi 7 – 130 L/s ve Froude sayısı 0.07 – 0.95 arasında değişmektedir. Deneyler, nehir rejimli ve kararlı akım şartlarında serbest savaklanma hali için yapılmıştır. Minimum nap kalınlığı 30 mm için ölçümler yapılarak, Froude ve debi katsayısı hesaplanıp gerekli grafikler çizilmiştir. Bu çalışmada, De Marchi yöntemi kullanılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda debi katsayısında azalma olduğu görülmüştür. Yapılan literatür taramalarında uygulanan yöntemler ile kıyaslandığında farklılık arz etmesinden dolayı bu çalışma hidrolik alanında üçgen labirent yan savaklar konusuna büyük katkı sağlayacaktır.

Anahtar Kelimeler: Doğrusal kanal, Debi katsayısı, Yan savak.

Influence on Discharge Coefficient of Crest Length Change in Triangular Labyrinth Side Weirs Placed in Straight Channels

Abstract

Side weirs; a hydraulic structure used to reduce excess discharge in a channel or to retrieve the required discharge from any channel. In this study, different spillway lengths of crest length were considered by using labyrinth side weirs instead of classical side weirs. The main purpose of study is to examine in detail the effect of the change of the crest length variation on the discharge capacity of the thin-edged labyrinth sidewalls. Experiments were carried out in a triangular weir with a weir width of 25, 50, 75 cm in the linear channel and a top angle of 45° for crest heights of 12, 16, 20 cm. Measurements were taken by the weir upstream crest length was shortened as three stages at each crest height. The experiments were changed by taken a flow change of 7-130 L/s and Froude number of 0.07-0.95. The experiments have been carried out under subcritical flow regime and steady flow conditions. Froude numbers and discharge coefficients were calculated and necessary graphics were plotted by measuring for minimum 30 mm nappe thickness. It has been determined that there is a decrease in discharge coefficient as a result of the study by using De Marchi Method. Since this study differs in comparison with the methods applied in literature reviews, this study will contribute greatly to the discussion of triangular labyrinth sidewalls in the hydraulic field.

Keywords: Straight channel, Discharge coefficients, Side weirs.

1. Giriş

Hidrolik yapılar; suyu kontrol altına alarak suyun çeşitli amaçlar için (örneğin akarsudaki akımın rejimini düzeltmek, su seviyesi kotunu yükseltmek, akarsu taşımacılığını geliştirmek, piknik alanları oluşturmak, balık yetiştirme

çiftlikleri oluşturmak vb.) kullanılmasını sağlayan çok önemli yapılardır [1]. Savaklar, küçük yüklü nap akımlarında ve kanallarda suyun akışını ölçmek için kullanılan en eski hidrolik yapılardandır [2]. Aynı zamanda savaklar, sulamada, yağmur suyu kanallarında, suların havalandırılmasında, oksijen transferinde,

kanalizasyon sistemlerinde yaygın olarak kullanılan hidrolik yapılardandır.

Savaklar genel olarak keskin kenarlı savaklar, kalın kenarlı savaklar ve labirent savaklar olmak üzere üç ana gruba ayrılmaktadır [3]. Ayrıca savaklar ya büzülmeli ya da büzülmesiz olarak inşa edilirler. Büzülmesiz savaklar normal karşıdan alışlı dolusavaklar gibi giriş kısmında herhangi bir daralma söz konusu değildir. Büzülmeli savaklarda ise kanalın her iki kısmında aynı oranda daralma yapılmaktadır [4]. Her iki tip de yaygın olarak kullanılmaktadır.

Savaklar akım doğrultusuna dik olacak şekilde yerleştirildikleri gibi, kırık doğrular veya daire şeklinde ve akış doğrultusu ile bir açı teşkil edecek şekilde de yerleştirilirler. Kret şekli debi deşarj kapasitesini etkileyen parametreler arasında yer almaktadır. Savaklar, hidrolik mühendisliğinde birçok alanda kullanıldığı için, bunların akım özelliklerinin ve farklı kret şekillerinin debi katsayısına etkisinin incelenmesi yararlı olacaktır. Tullis vd. [5], labirent dolusavakların tasarım ilkeleri ile ilgili yaptıkları çalışmalarında kret şeklinin debi katsayısı üzerinde önemli etkisinin olduğunu vurgulamıştır. Amanian [6], yüksek lisans tez çalışmasında; labirent savakların tasarım performansının, savak yüksekliğinin, kalınlığının ve şeklinin debi deşarj kapasitesi üzerinde önemli etkilerinin olduğunu ifade etmiştir. Aynı şekilde Waldron [7]'de yüksek lisans tezinde bu konunun önemini vurgulamış ve labirent savaklar üzerinde deneysel çalışmalar yapmıştır. Emiroğlu vd. [8], trapez labirent yan savakların hidrolik karakteristiklerini ve deşarj kapasitelerini deneysel olarak araştırmışlardır. Bu tip yan savakların debi katsayılarının klasik yan savaklarınkinden 1.5 – 4.5 kat daha fazla olduğunu sonucuna varmışlardır. Savak açıklığını geniş bir aralıkta yapılan deneyler ile incelemişlerdir. Etkili tüm boyutsuz parametreler dikkate alan doğrusal olmayan bir eşitlik elde etmişlerdir.

Emiroğlu vd. [9] bir ve iki gözlü trapez labirent yan savakların hidrolik karakteristiklerini deneysel olarak araştırmışlardır. Yaptıkları çalışmada De Marchi yaklaşımını uygulayarak belirli bir savak açıklığında bir gözlünün mü yoksa iki gözlünün mü daha uygun olduğunu ayrıntılı olarak

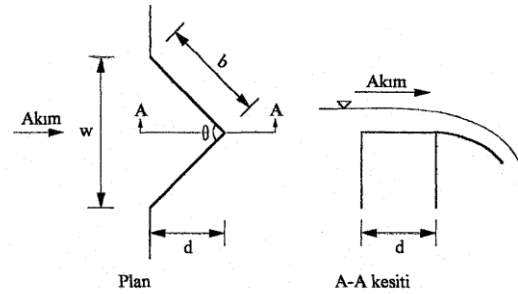
incelemişlerdir. Hem bir gözlü trapez labirent yan savak için ve hem de iki gözlü trapez labirent yan savak için doğrusal olmayan güvenilir eşitlikler elde etmişlerdir.

Savağın etkili kret uzunluğu artırılarak dolusavakların deşarj kapasiteleri artırılabilir. Bu amaçla çeşitli geometrik plan formlarına sahip savakların projelendirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Dikdörtgen yan savakların yerine çok daha büyük debi deşarj kapasitesine sahip labirent yan savakların kullanılmasının daha avantajlı olacağı inanılmaktadır. Bu nedenle labirent yan savak tipinin de alternatifler arasında yer alacağı kaçınılmazdır. Labirent ismini savağın geometrik formundan almaktadır. Labirent savak uygulaması bulunan bazı barajlar şunlardır: Ritschard Barajı (ABD), Sarioğlan Barajı (Türkiye), Kızılcapınar Barajı (Türkiye), Avon Barajı (Avusturalya), Hyrum Barajı (A.B.D), Ute Barajı (A.B.D), Lake Brazos Dam (Texas) [10].



Şekil 1. Lake Brazos Barajı (Texas) [11]

Üçgen labirent savaklar, kreti düz olmayan savak çeşididir. Kretin düz olmamasından dolayı kret uzunluğu artmaktadır. Bu artan kret uzunluğu labirent savaklarda, memba seviyesinin düşmesi gibi önemli bir avantaj meydana getirmektedir. Kret boyunun arttırılmasıyla daha fazla debi geçirmek mümkün olmaktadır. Şekil 2'de üçgen labirent savak plan ve boykesiti verilmiştir.



Şekil 2. Üçgen labirent savak plan ve boykesiti

Bu çalışmada, bu güne kadar kullanılan ince kenarlı yan savakların (klasik savaklar) yerine labirent yan savaklar kullanılmış olup, üçgen labirent yan savaklarda farklı kret şekillerinin debi deşarj kapasitesi üzerine etkisi deneysel olarak detaylı bir şekilde incelenmiş ve literatürdeki verilerle karşılaştırma yapılmıştır. Yan savak debi katsayısının hesaplanmasında farklı metotlar kullanılabilir. Bu çalışmada, De Marchi metodu kullanılarak farklı kret uzunlukları için bir dizi deneyler gerçekleştirilmiştir. Deney modelinden elde edilen veriler kullanılarak, debi katsayısının hem Froude sayısına (Fr) ve hem de boyutsuz nap yükü değerine $[(y_1-p)/p]$ göre değişimleri incelenmiştir.

2. Debi Katsayısı Belirleme Yöntemi

2.1. De Marchi yaklaşımı

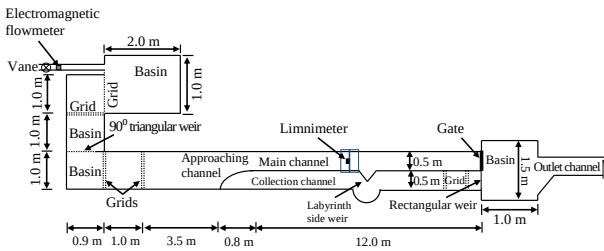
De Marchi debi katsayısını belirlemek için, yan savak boyunca özgül enerjinin sabit kaldığını varsayarak teorik bir çalışma yapan ilk araştırmacılar arasında yer almaktadır. Su yüzü diferansiyel denkleminin kapalı çözümü için ilk kez De Marchi [12] tarafından bir yaklaşım geliştirilmiş ve (1) eşitliği elde edilmiştir.

$$C_d = \frac{3}{2} \frac{B}{L} (\Phi_2 - \Phi_1) \quad (1)$$

Burada; C_d =debi katsayısı, B =ana kanal genişliğini, L =savak açıklığını ifade etmektedir. (Φ_i) için geçerli olan eşitlik, (2) bağıntısında sunulmuştur. (Φ_i) değişken akış fonksiyonu, E özgül enerji, y akım derinliği, p savak yüksekliğini göstermektedir.

$$\Phi_i = \frac{2E_i - 3p}{E_i - p} \sqrt{\frac{E_i - y_i}{y_i - p}} - 3 \sin^{-1} \left(\sqrt{\frac{E_i - y_i}{y_i - p}} \right) \quad (2)$$

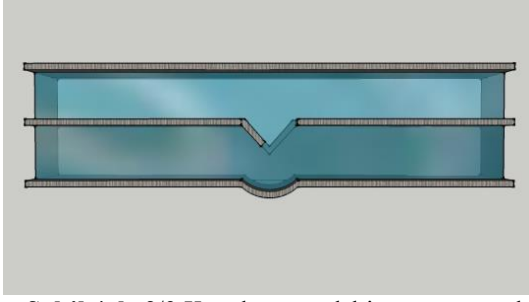
3. Deney Düzeneği ve Deneysel Çalışma



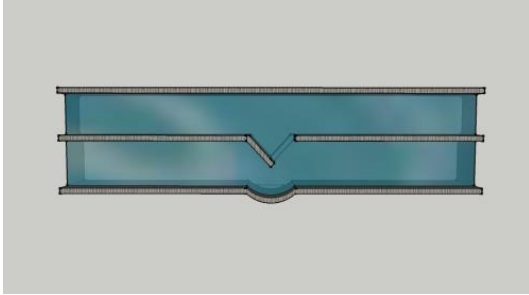
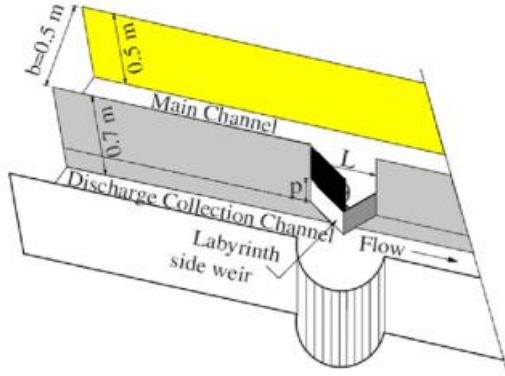
Şekil 3. Deney seti

Deneyler, Şekil 3'de gösterilen deney düzeneği kullanılarak Fırat Üniversitesi Hidrolik Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir.

Kullanılan deney setinin uzunluğu 18.20 m olup ana ve toplama kanalının genişliği 0.50 m ve eğimleri 0.001'dir. Yan duvarları cam ile kapatılmış olan ana kanalın derinliği 0.50 m ve toplama kanalının derinliği ise 0.70 m'dir (Şekil 3). Ana kanal ile toplama kanalı birbirinden ince bir sac ile ayrılmıştır. Deneylerde üçgen labirent yan savak kullanılmıştır. Üçgen labirent yan savak, tam gelişmiş akım koşullarını sağlayacak şekilde, kanalın giriş kısmından belli bir mesafe sonra bırakılmıştır. Yan savakların yerleştirileceği kısımların karşısındaki toplama kanalı genişliği 1.30 m yarıçapında daire şeklinde tasarlanmıştır. (Şekil 3). Bunun nedeni, akıma herhangi bir müdahale olmadan labirent yan savaktan serbest naplı savaklanmanın sağlanmasıdır. Akım derinliği, x ve y doğrultusunda hareket edebilen ölçüm arabasına monteli bir dijital limnometre (Mitutoyo marka, ± 0.01 mm hassasiyetli) ile ölçülmüştür. Sistem için debi, ana hazneye bağlı 0.25 m çaplı ana borudan cazibeli olarak akıtılmıştır. Debi, besleme hattına monte edilmiş bir Siemens elektromanyetik akış ölçer vasıtasıyla ± 0.01 L/s doğrulukla ölçülmüştür. Ayrırma duvarının üzerinde çeşitli kret yüksekliklerinde üçgen labirent yan savaklar yerleştirilmiştir. Kararlı akım şartlarını sağlamak için, kanalın memba kısmına ve toplama kanalının sonundaki uygun kısımların önüne delikli tuğlalar bırakılmıştır. Özellikle ölçek etkilerinden doğabilecek ölçek etkilerini minimize etmek için, minimum nap yüksekliği 0.03 m alınmıştır. Deneylerde debi değerleri 7 ve 130 L/s arasında, Froude sayısı ise 0.07 ile 0.95 arasında değiştirilmiştir. Deneyler; sabit tabanlı doğrusal kanalda $L=0.25, 0.50, 0.75$ m savak genişliklerinde, $p=0.12, 0.16$ ve 0.20 m kret yüksekliklerinde ve $\alpha=45^\circ$ lik tepe açısına sahip üçgen labirent yan savaklar kullanılarak yapılmıştır. Deneyler serbest savaklanma hali için, nehir rejimli ve kararlı akım şartlarında gerçekleştirilmiştir. Labirent yan savak teknesi ile ana kanal kotu aynı seviyededir. Bu çalışmada, üç farklı levha boyutuyla birlikte savak uzunluğunun kapatıldığı (dolayısıyla kısaltıldığı) ve savak uzunluğunun kapalı

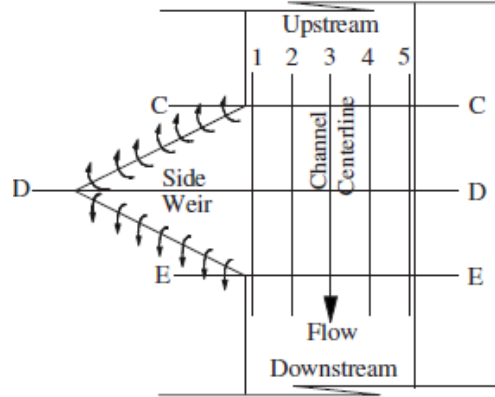


Şekil 4. b. 2/3 Kapalı üçgen labirent yan savak



Şekil 4. c. 3/3 Kapalı üçgen labirent yan savak

Şekil 5'de görüldüğü gibi, su derinliği ölçümleri, C3, D3 ve E3 kanal merkez hattı boyunca ve ana kanalın C1, D1 ve E1'in yan savak tarafındaki noktalarda limnimetre kullanılarak yapılmıştır. Limnimetre, ray üzerinde her iki yönde de hareket edebilen özel bir düzenek yardımıyla okumalar gerçekleştirilmiştir [13].



Şekil 5. Uzunlamasına derinliklerin ölçüldüğü yerler [13]

Deneyler serbest savaklanma hali için, nehir rejimli ve kararlı akım şartlarında yapılmıştır. Novak ve Cabelka [16] yapmış oldukları çalışmada minimum nap yüksekliği 0.03 m'den az olmaması gerektiğini göstermiştir. Bu nedenle minimum nap yüksekliği 30 mm olarak kabul edilmiştir. Deneyler 0.25, 0.50, 0.75 m savak uzunluğu, 0.12, 0.16 ve 0.20 m savak yüksekliği ve 45° savak tepe açısında yapılmıştır. Tablo 1'de test değişkenleri aralığı ve labirent yan savak gösterim ve noktaları gösterilmiştir. Doğrusal kanaldaki labirent yan savak akışının iyi bir fiziksel tanımlamasının ardından labirent yan savak akış oranları, farklı Froude sayısı, farklı p / y_1 oranı, farklı ℓ / L oranının debi katsayısı üzerindeki değişimini göstermek amacıyla bir dizi deneyler yapılmıştır.

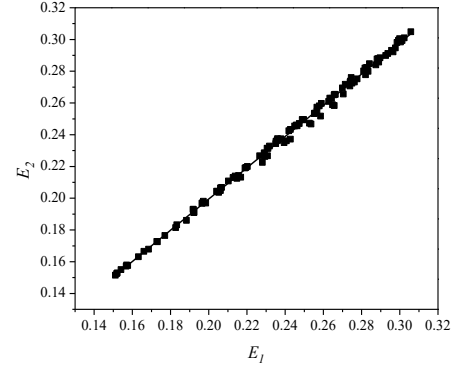
4. Bulguların Yorumlanması

Bu çalışmada, labirent yan savaklarda memba kret uzunluklarının debi katsayısı üzerine etkisini incelemek için, özellikle Froude sayısı Fr , boyutsuz kret yüksekliği p/y_1 , boyutsuz savak genişliği L/B , boyutsuz kret uzunluğu ve tepe açısı α dikkate alınarak deneyler yapılmıştır.

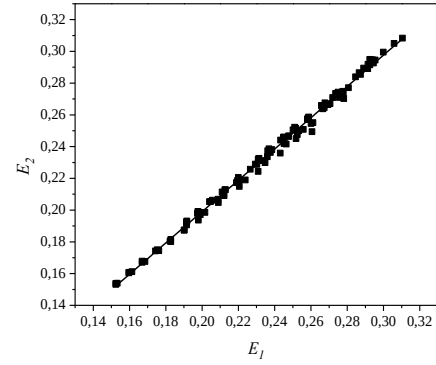
Yan savakların tasarımında en yaygın ve temel ilkelerinden biri olan De Marchi [12] yöntemini uygulamak için ana kanal dikdörtgen kesitli olarak düzenlenmelidir. Aksi takdirde, yöntem kesit alanı için uyarlanmalıdır. Yan savağın memba ve mansabında sabit bir spesifik enerjinin kabul edilmesi sağlanmalıdır. Deneyler

dikdörtgen kesiti olan açık bir kanalda yapılmasından dolayı De Marchi denklemi uyarlanmaksızın uygulanmıştır. Dahası, De Marchi denkleminin kullanılması için, yan savak memba ve mansap arasındaki spesifik enerjideki fark ihmal edilebilir durumu göz önünde bulundurulmalıdır ($< \% 4$) [14]. Şekil 6'da görüldüğü gibi farklı L/B oranları için çizilen E_1 ve E_2 değerlerine ait grafiklerde hemen hemen tüm değerlerin 45° çizgi hattına yakınsadığı görülmüştür. E_1 ve E_2 arasındaki ortalama fark hesaplamalar sonucunda yaklaşık $\%0.47$ olduğundan De Marchi yaklaşımının güvenle uygulanabileceği sonucuna varılmıştır.

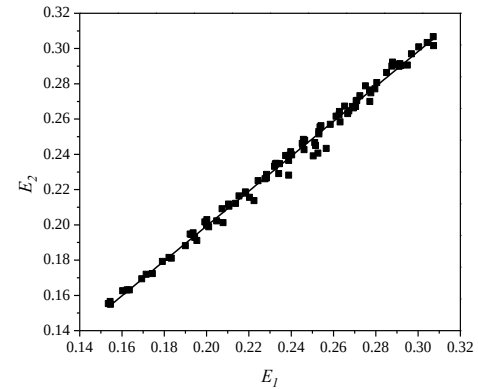
Debi katsayısı üzerindeki $(y_1-p)/p$ parametresinin etkisini göstermek için, C_d' ye karşı $(y_1-p)/p$ değerleri Şekil 7'de grafiklerde verilmiştir. Şekil 7, $(y_1-p)/p$ değeri arttıkça debi katsayısının azaldığını göstermektedir. Yine Şekil 7'de görülebileceği gibi, üçgen yan savak kapasitesi de nap ile değişim göstermektedir. Khode ve diğ. [15] labirent dolusavaklardaki deşarj kapasitesinin su nap kalınlığı arttıkça azaldığını bulmuşlardır. Benzer şekilde, bu çalışmada su nap kalınlığı arttıkça deşarj kapasitesinde de düşme gözlemlenmiştir. Akım derinliği küçük olduğunda, akış savağın tüm uzunluğu boyunca serbestçe düşmektedir. Hava akışı mansap ve köşelerden erişime sahiptir. Emiroğlu ve diğ. [13] düşük eğim açılarında bu azalış eğiliminin daha yüksek olduğunu göstermiştir. Şekil 7'de, napın artmasıyla, tepe üzerindeki akış yan savakların üzerindeki akıştan dolayı değişime uğramaktadır. Şekil 7. (a), (b) ve (c)'de gösterildiği gibi $L/B=0.5$ oranında tam açık ve $1/3$ kapalı durumu yer yer birbirleri ile yer değişimi göstermesine rağmen tam açık durumunda debi katsayısı daha yüksektir. Üç grafikte gösteriyor ki, debi katsayısının yüksek olduğu durum tam açık halidir. Sırasıyla $1/3$, $2/3$ ve $3/3$ kapalı durumu izlemektedir.



(a)

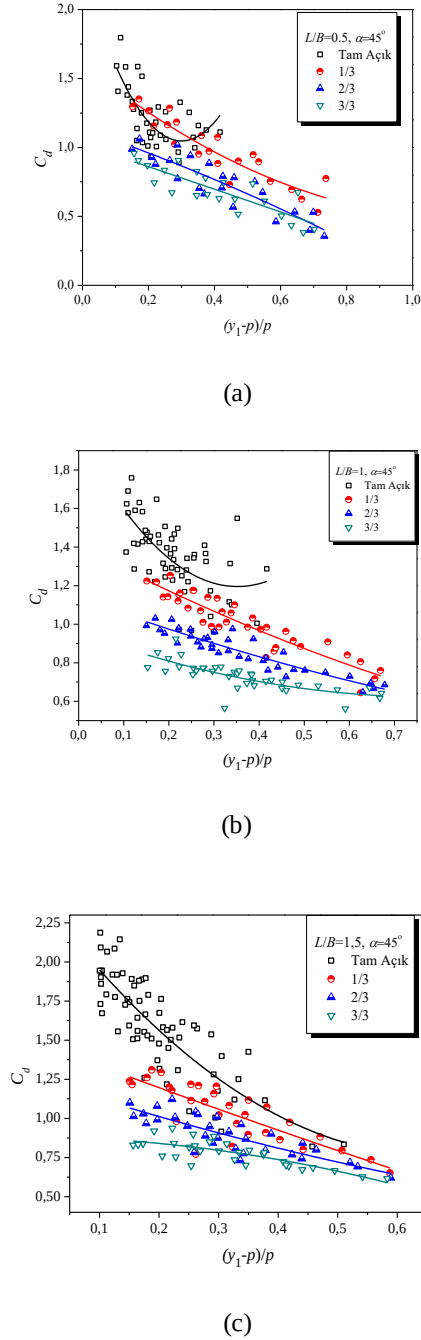


(b)



(c)

Şekil 6. E_1 ile E_2 karşılaştırılması: a) $L/B = 0.5$
b) $L/B = 1.0$ c) $L/B = 1.5$



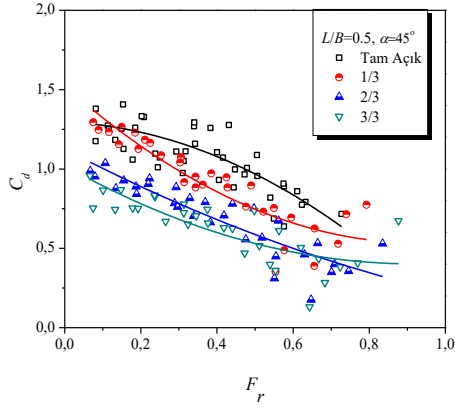
Şekil 7. Savak kret uzunlukları ve farklı L/B değerleri için $(y_1-p)/p$ değerlerine karşı debi katsayısının (C_d) değişimi: **a)** $L/B = 0.5$ **b)** $L/B = 1$ **c)** $L/B = 1.5$

Şekil 8 de, $L/B=0.50, 1.0, 1.5$ boyutsuz savak genişlikleri için tam açık, 1/3, 2/3 ve 3/3 farklı boyutsuz savak kret uzunlukları ile birlikte, Froude sayısı ile deşarj katsayısının değişimini

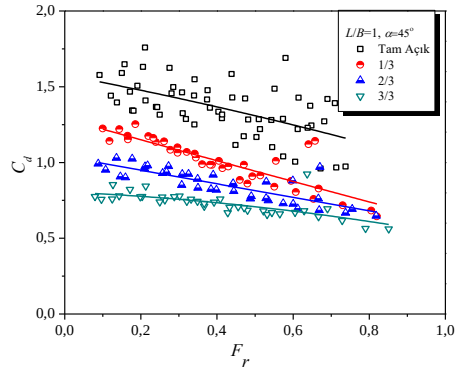
vermektedir. Debi katsayısı (C_d), Froude sayısının (Fr) artmasıyla azaldığı görülmüştür. Bununla birlikte, azalma eğilimi düşüktür. Şekil 8a'da düşük Froude sayılarında tam açık ile 1/3 kapalı durumlarına bakıldığında birbirlerine yakın değerler elde edilmiş olduğu görülmektedir. Froude sayısının artması ile debi katsayısının düşmesi durumunda ise 2/3 ile 3/3 kapalı durumları yakın seyir etmektedir. Şekil 8(a), (b) ve (c) grafiklerinden çıkan sonuç $L/B = 0.5, 1.0, 1.5$ oranları için en iyi debi katsayısının tamamen açık olması durumunda söz konusudur. Sırasıyla 1/3, 2/3, 3/3 oranında memba kret uzunluklarının kapatılması ile debi katsayısında azalma görülmüştür. Şekil 8'de görüldüğü gibi tam açık durumda (C_d) daha fazla değişkenlik gösterdiği (saçılım) görülmektedir. Fakat diğer durumlarda bu kadar saçılım söz konusu değildir.

Şekil 9'da verilen grafiklerde yan savaklarda memba kret uzunluğunun farklı L/B oranlarına göre debi katsayısı ile Froude sayısı arasındaki ilişki irdelenmiştir. Görülen o ki; burada da Froude sayısının artması ile debi katsayısında azalma olduğu görülmektedir. Debi katsayısının, kret uzunlukları dikkate alındığında L/B oranlarına göre yüksek çıktığı oran 1.5'dir. Bunu sırasıyla 1.0, 0.5 oranları izlemektedir.

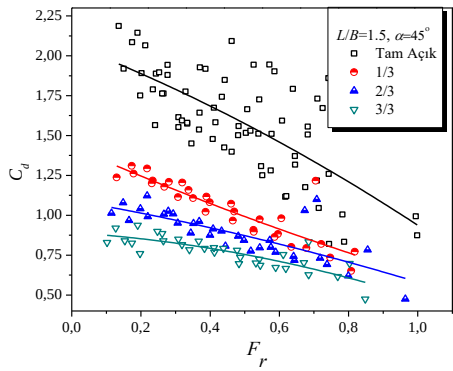
Memba kret uzunluğunun farklı L/B oranlarına göre debi katsayısı ile $(y_1-p)/p$ arasındaki bağıntıyı vermektedir (Şekil 10). Şekil 10'daki verilere dayanarak, debi katsayısının en düşük olduğu $L/B=0.5$ durumudur. $L/B=1.0$ ve 1.5 oranları birbirine yakın seyir etmektedir. Şekil 10a gösteriyor ki $(y_1-p)/p$ oranının yaklaşık 0.25 değerinden sonra $L/B=1.5$ ve 1.0 değerleri yer değiştirmektedir. Aynı durum Şekil 10b'de yaklaşık 0.32 ve Şekil 10c'de yaklaşık 0.46 değerlerinde ortaya çıkmaktadır.



(a)

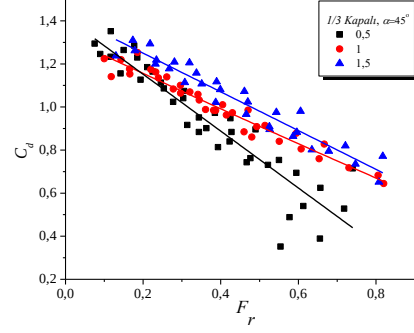


(b)

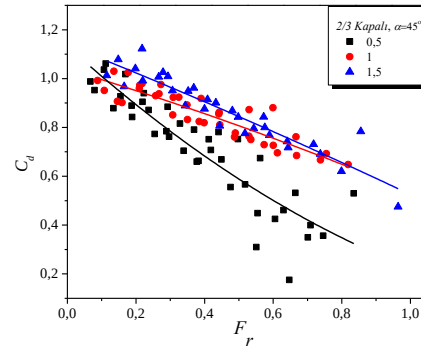


(c)

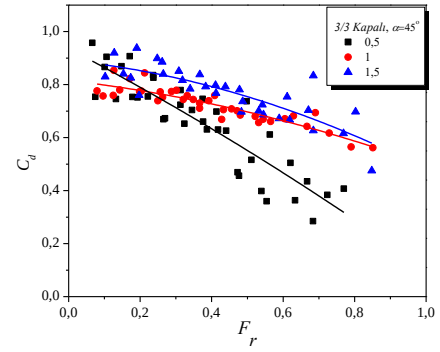
Şekil 8. Farklı savak kret uzunlukları ve farklı L/B değerleri için debi katsayısı (C_d) ile Froude sayısına (Fr) göre değişimi: **a)** $L/B=0.5$ **b)** $L/B=1$ **c)** $L/B=1.5$



(a)

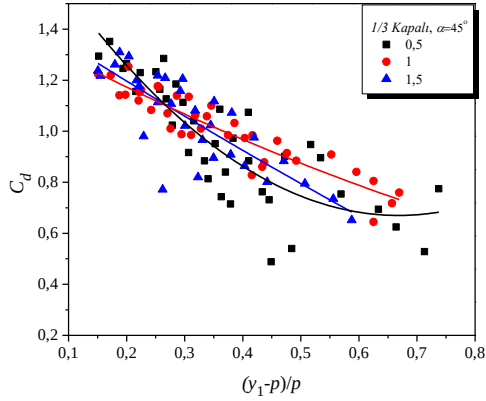


(b)

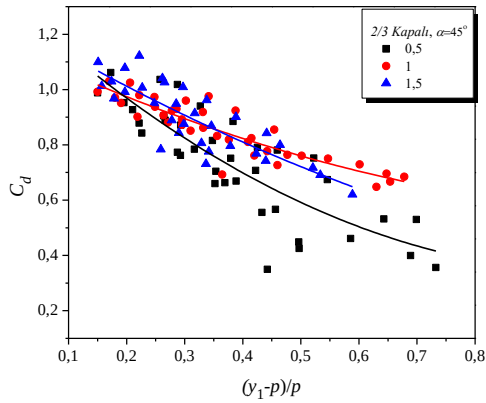


(c)

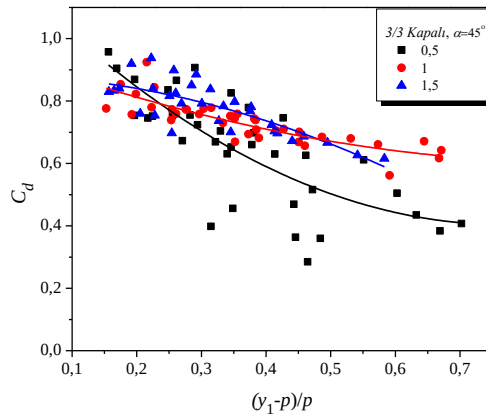
Şekil 9. Farklı membra kret uzunluklarında ve $L/B=0.5, 1.0, 1.5$ durumunda debi katsayısı (C_d) ile Froude sayısının (Fr) değişimi: **a)** 1/3 Kapalı **b)** 2/3 Kapalı **c)** 3/3 Kapalı



(a)



(b)



(c)

Şekil 10. Savak kret uzunluklarının ve farklı L/B değerleri için $(y_1-p)/p$ değerlerine karşı debi katsayısının (C_d) değişimi: **a)** 1/3 Kapalı **b)** 2/3 Kapalı **c)** 3/3 Kapalı

5. Sonuçlar

Bu çalışmada, üçgen yan savakların deşarj kapasiteleri, sabit boyutsuz yan savak uzunlukları (L/B) ve kret yükseklikleri (p) ile birlikte yan savak tepe açısı ($\alpha=45^\circ$) için debi katsayısının değişimi Froude sayısına göre irdelenmiş ve De Marchi yöntemi uygulanarak hesaplanmıştır. De Marchi yaklaşımı, çeşitli debi katsayılarının hesaplanmasında önemli bir rol oynamaktadır. Laboratuvar deneyleri, doğrusal kanal üzerinde bulunan labirent yan savak üzerinde Fr , p/h_1 , L/b , L/ℓ boyutsuz parametrelerin debi katsayısı üzerindeki etkisini araştırmak için yapılmıştır. Deney verileri ve grafikler yorumlandığında Froude sayısının artması ile debi katsayısında azalma olduğu gözlemlenmiştir. Tepe açısının 45° olduğu, farklı kret uzunlukları ve farklı L/B oranları için Fr ve C_d karşılaştırıldığında, maksimum debi katsayısının tamamen açık üçgen labirent yan savakta olduğu görülmüştür. Maksimumdan minimum değere göre sıralama yapılması durumunda memba kret uzunluklarının 1/3, 2/3, 3/3 oranında kapatılarak yapılan seriler olduğu gözlemlenmiştir. Memba kret uzunluğunun azalması durumunda debi katsayısında bir azalma olduğu görülmüştür. $(y_1-p)/p$ oranı arttıkça debi katsayısının azaldığı sonucuna varılmıştır. Bazı grafiklerde memba kret uzunluğunun tam açık olduğu durum ile 1/3 kapatılma durumu ne kadar yakın olsalar bile tam açık olması durumunda debi katsayısı daha yüksek olduğu görülmüştür. Sonuç olarak, doğrusal kanalda yapılan deneyler de üçgen labirent yan savakların memba kret uzunluğunun azaltılması debi katsayısında azalmaya neden olmuştur. Aynı zamanda L/B oranı arttıkça debi katsayısında artış gözlemlenmiştir.

6. Kaynaklar

1. USBR, (1987). Design of Small Dams 3rd edition, Bureau of Reclamation, U.S. Department of the Interior.
2. USBR, (2001). Water Measurement Manual 3rd edition, Water Resources Research Laboratory, Bureau of Reclamation, U. S. Department of the Interior.

3. Chanson, H. (2004). The Hydraulics of Open Channel Flow: An Introduction. *Butterworth-Heinemann, Oxford, UK, 2nd edition*, 630 pages (ISBN 978 0 7506 5978 9).
4. Sturm, T.W. (2001). Open Channel Hydraulics . McGraw Hill, Boston, USA, *Water Resources and Environmental Engineering Series*, 493 pages.
5. Tullis, J.P., Amanian, N. and Waldron, D., (1995). Design of Labyrinth Spillway. *Journal of Hydraulic Engineering*, **121(3)**:247-255.
6. Amanian, N. (1987). Performance and design of labyrinth spillway. *MSc thesis, Utah State University, Logan, Utah*.
7. Waldron, D.R. (1994). Design of labyrinth weirs. *MSc thesis, Utah State University, Logan, Utah*.
8. Emiroglu, M.E. and Kaya, N. (2011). Discharge coefficient for trapezoidal labyrinth side weir in subcritical flow. *Water resources management*, **25(3)**: 1037-1058.
9. Emiroglu, M.E., Aydin, M.C. and Kaya, N. (2014). Discharge characteristics of a trapezoidal labyrinth side weir with one and two cycles in subcritical flow. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000709.
10. Emiroglu, M.E., Tunc, M. and İkinçioğulları, E. (2016). Determination of Discharge Capacity at The Triangular Labyrinth Side Weirs Using Different Approaches. *10th Icold European Club Symposium, Antalya*
11. <https://www.freese.com/our-work/lake-brazos-labyrinth-weir>
12. De Marchi, G. (1934). Essay on the performance of lateral weirs. *L'Energia Elettrica*, Milan. **11(11)**: 849-860.
13. Emiroglu, M.E., Agaccioglu, H. and Kaya, N. (2011). Discharging capacity of rectangular side weirs in straight open channels. *Flow Measurement and Instrumentation*. **22(4)**: 319-330.
14. Emiroglu, M.E., Kaya, N. and Agaccioglu, H. (2010). Discharge capacity of labyrinth side weir located on a straight channel. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000112, 37–46.
15. Khode, B.V., Tembhurkar, A.R., Porey, P.D. and Ingle, R.N. (2012). Experimental studies on flow over labyrinth weir. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000336, 548–552.
16. Novák, P. and Cabelka, J. (1981). Models in hydraulic engineering; physical principles and design applications. *Pitman Advanced Publishing Program*.

IRI ve IONOLAB Toplam Elektron İçeriğinin Şiddetli Jeomanyetik Fırtınalara Tepkisinin Karşılaştırılması

Ramazan ATICI¹

¹ Muş Alparslan Üniversitesi, Eğitim Fakültesi, Temel Eğitim Bölümü, 49250 Muş
e-mail: r.atici@alparslan.edu.tr

(Geliş/Received: 25.05.2017; Kabul/Accepted: 20.07.2017)

Özet

Bu çalışmada 17 Mart ve 22-23 Haziran 2015 tarihlerinde meydana gelen şiddetli jeomanyetik fırtınalar süresince IRI (International Reference Ionosphere) and IONOLAB (Ionosphere Research Laboratory)'dan elde edilen Toplam Elektron İçeriği (TEC) değerleri karşılaştırıldı. Bir jeomanyetik fırtına solar (Bz, Vp ve Np) ve jeomanyetik (Dst, Kp and Ap) indisler aracılığıyla tanımlandı. TEC değerleri Türkiye'nin Ankara istasyonu için GPS-temelli IONOLAB tahmin yöntemi ve ampirik bir model olan IRI-2012 modeli aracılığıyla elde edildi. Araştırmanın sonucunda 17 Mart 2015 şiddetli jeomanyetik fırtınanın başlangıç ve ana fazı süresince IRI-2012 TEC değerleri (~ 38 TECU) değişmezken IONOLAB-TEC değerlerinin (~ 64 TECU) aynı süreçte önemli derecede artmıştır. 22-23 Haziran 2015 şiddetli jeomanyetik fırtınası süresince fırtınanın tüm fazlarında IONOLAB-TEC değerleri diğer fırtına ile karşılaştırıldığında daha az değişim gösterir. Her iki fırtına süresince IRI modelinin TEC değerlerini fırtınanın öncesinde genellikle daha düşük ve fırtınanın sonrasında daha yüksek tahmin ettiği görülmüştür. Sonuç olarak IONOLAB tahmin metodunun şiddetli jeomanyetik fırtına süresince orta enlemde bulunan Türkiye'nin Ankara istasyonu üzerinde meydana gelen tedirginliklere IRI modelinden daha duyarlı olduğu söylenebilir.

Anahtar Kelimeler: Jeomanyetik fırtınalar, IRI-2012, IONOLAB, TEC.

Comparison of Response to Extreme Geomagnetic Storms of IRI-2012 and IONOLAB TEC Values

Abstract

In this study, IRI (International Reference Ionosphere) and IONOLAB (Ionosphere Research Laboratory) Total Electron Content (TEC) values during severe geomagnetic storms on March 17, 2015 and June 22-23, 2015 are compared. The geomagnetic storm is determined by the solar (Bz, Vp and Np) and geomagnetic (Dst, Kp and Ap) indices. TEC values are obtained by IONOLAB estimation method with GPS based and IRI-2012 model, which is an empirical model, at Ankara, Turkey. As a result of investigation, IRI-2012-TEC values (~ 38 TECU) are not change, while IONOLAB-TEC values increase significantly (~ 64 TECU) in the initial and main phase of the March 17, 2015 severe geomagnetic storm. In addition, maximum IONOLAB-TEC values decrease by 23 TECU during the recovery phase of the storm, but no change occur in IRI-2012 TEC values. During the severe geomagnetic storm on June 22-23, 2015, IONOLAB-TEC values in all phases of the storm show less change compared to the other storm (March 17, 2015). During both storms, it is seen that the IRI model predicts lower TEC values than the IONOLAB estimation method before the storms, and generally higher predicts after the storms. Finally, it can be said that the IONOLAB estimation method is more sensitive than the IRI-2012 model to the disturbances that occur at Ankara station, Turkey located in the mid-latitude, during the severe geomagnetic storm.

Key Words: Geomagnetic storms, IRI-2012, IONOLAB, TEC.

1. Giriş

İyonküre hem aşağıdan hem de yukarıdan etki eden çok çeşitli süreçler aracılığıyla meydana gelir. [1-4]. İyonküresel toplam elektron içeriği (TEC), özellikle manyetik fırtına dönemlerinde, iyonküreye ait durumu belirlemek için son

dönemde yaygın olarak kullanılan bir parametredir [5-10]. Jeomanyetik fırtına süresince manyetoküre içinde depolanan Güneş (Güneş) rüzgar enerjisi aşamalı olarak iyonküre ve termoküre içerisine aktarılır. Bu sürecin iyonküresel TEC değerinde büyük oranda artma veya azalmalara sebep olacağı ifade edilmiştir [5,

6, 11-16]. TEC parametresi güneş olayları ve jeomanyetik fırtınalara bağlı olarak değişim gösterir [5, 11, 17]. TEC'in Jeomanyetik fırtınalara göre değişimi, iyonkürenin sakin ve tedirgin durumları için ayrı ayrı ele alınır. Dahası, TEC'in jeomanyetik fırtınalar süresince değişimi coğrafik enleme göre de ayrı ayrı çok sayıda çalışmada incelenmiştir [9, 18-25].

Jeomanyetik fırtınanın ekvator bölgesindeki iyonlaşma anormalliği (EIA) üzerinde hem negatif hem de pozitif değişimlere sebep olduğu bildirir [26]. Fırtına esnasında büyük ölçekli rüzgarlar, elektrik alanın ve akımın varlığı elektronların yeniden dağılımında en büyük itici güç olduğu çoğu yazar tarafından bildirilmiştir [17, 27]. Orta enlem iyonküresi üzerinde jeomanyetik fırtınaların büyük bir etkiye sahip olduğu vurgulanmıştır. Bu etkilerden pozitif olanlarına hızlı nüfuz eden elektrik alanların ve ekvator yönündeki nötr rüzgarların, negatif olanlarına ise ekvator yönündeki nötr rüzgarların birleşen (kaldırılabilir) değişim etkisinin sebep olduğu vurgulanmıştır. Kutup bölgelerinde ise jeomanyetik fırtına süresince iyonküreye ait tedirginliklerin oluşmasının auroral parçacıklar ve joule ısınmasından elde edilen ısı enerjisine bağlı olduğunu önerilmiştir [9].

İyonküreye ait İyonosferik (iyonküreye ait) TEC değeri yer temelli ve dünya yüzeyine çokça yayılmış olan GPS istasyonları ve uydular aracılığıyla kestirilmektedir [28-31]. TEC değeri ayrıca yarı deneysel modeller (International Reference Ionosphere-IRI (IRI-2007, IRI-2012-2016, IRI- PLUS gibi alt versiyonlara sahip olan), NeQuick gibi) yardımıyla da tahmin edilmektedir [28, 32-34]. Bu yarı deneysel modellerin kestirim sonuçlarını daha net hale getirme çalışmaları, sürekli olarak çalışılan iyonküreye ait konular arasında yer almaktadır [18, 32, 35-42].

Bu çalışmanın ana amacı GPS-tabanlı tahmin yöntemi ve yarı-deneysel IRI-2012 modeli ile elde edilen TEC değerlerinin şiddetli jeomanyetik fırtınalara tepkisini karşılaştırmaktır. Bu karşılaştırma orta enlem bölgesindeki Türkiye'nin Ankara istasyonu koordinatlarında (39.7 K; 32.76 D) 17 Mart ve 22-23 Haziran 2015 şiddetli jeomanyetik fırtınalarından üç gün öncesini ve sonrasını kapsayan günler için yapıldı. Ayrıca, TEC değerleri ve solar (Bz GSE, proton

yoğunluğu (Np) ve proton hızı (Vp)) ve jeomanyetik (Kp, Ap ve Dst) indisler arasındaki ilişki de incelendi.

2. Materyal ve Metot

IRI, verilen konum, tarih ve saate göre 60-2000 km arasındaki yüksekliklerde elektron yoğunluğu başta olmak üzere TEC değerinin de içinde bulunduğu iyonküreye ait ilişkin çok sayıda parametre değerlerini sunabilmektedir [28]. Bu çalışmada TEC değerlerini IRI-2012 modelinden elde etmek için IRI ana sayfasında bulunan web ara yüzü kullanılmıştır (http://omniweb.gsfc.nasa.gov/vitmo/iri2012_vitmo.html).

GPS alıcıları, kod ve faz gözlemlerini toplar. GPS gözlemleri aracılığıyla iyonküreye ait gecikmelerin algılanması için GPS-uydu arasında ışın yolunda bulunan elektron içeriği kullanılır. Uydu-alıcı arasındaki ışın yolunda mevcut olan TEC değeri farklı yollarla elde edilir. Bu konuda detaylı bilgi için [30] nolu referansa bakabilirsiniz. IONOLAB grubu, GPS alıcılarından RINEX formatında sağlanan verilerden TEC değerlerini elde etmek için *ionolabtec v1.0* programını geliştirmişlerdir. Bu program aracılığıyla elde edilen TEC verileri kullanışlı bir internet ara yüzü aracılığıyla elde edilebilmektedir. Bu çalışmada IONOLAB TEC verileri <http://www.ionolab.org> adresinden elde edildi [43]. İki farklı yolla elde edilen TEC değerlerinin karşılaştırmaları, fırtınadan önce, sırasında ve sonrasında korelasyon analizi ile yapılmıştır. Her fırtına için sonuçlar, Sonuçlar ve Tartışma bölümünde ayrı olarak sunulmuştur. Şiddetli jeomanyetik fırtınayı tanımlamak için jeomanyetik (Kp, Ap ve Dst) ve solar (Bz, Vp ve Np) indisleri seçilmiştir [5, 21, 44]. Bu indis değerleri NSSDC'nin veri bankasından alınmıştır (<http://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>).

3. Bulgular ve Tartışma

Literatürde, tedirgin bir gün $K_p \geq 4$, $A_p \geq 26$ ve $Dst \leq -30$ nT olduğu bir gün olarak tanımlanmıştır [5, 15, 16]. Bu çalışmada IRI-2012 ve IONOLAB modelinin 17 Mart 2015 ($Dst = -223$ nT, $K_p = 8$ ve $A_p = 179$ nT, burada "fırtına 1" olarak

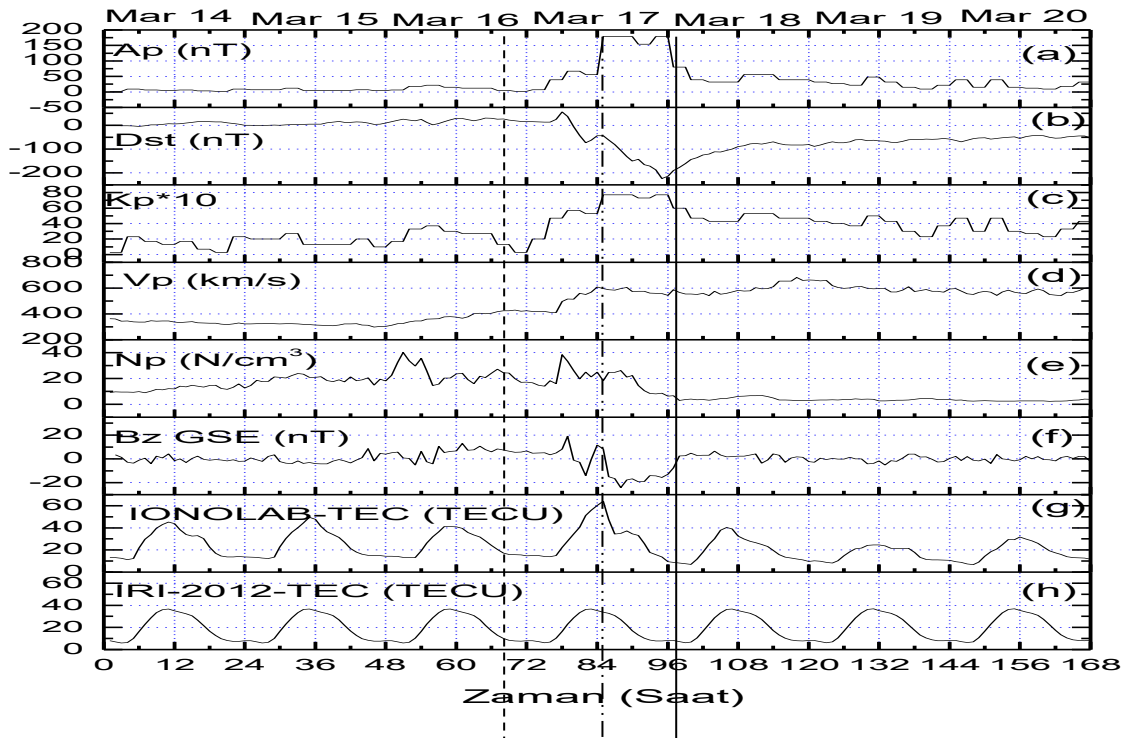
anılır) ve 22-23 Haziran 2015 ($Dst=-204$ nT, $K_p=8$ ve $A_p=179$ nT, burada “fırtına 2” olarak anılır) şiddetli jeomanyetik fırtınalarının üç gün öncesi ve üç gün sonrasında orta enlem bölgesinde iyonosferik TEC değerlerindeki değişimleri algılama hassasiyetleri karşılaştırıldı ve TEC değişimlerinin sebepleri tartışıldı.

3.1. Fırtına 1 için sonuçlar

3.1.1. Fırtına 1 süresince solar ve jeomanyetik indislerin değişimi

Şekil 1’de (a)-(c), sırasıyla A_p , Dst , K_p indislerinin (d)-(f) ise V_p , N_p ve B_z ’nin zamana göre değişimi göstermektedir. Şekil 1-f’den B_z değerinin hem kuzey hem de güney yönünde iki pike sahip olduğu görülmektedir. 17 Mart 04:00 UT’de B_z değeri 8.2 nT iken saat 05.00 UT’de kuzey yönünde ani bir artışla 19 nT’lık ilk pik

değerine ulaşmıştır. Bu durum daha önceki çalışmalarda da ifade edildiği gibi gezegenler arası ortamdaki enerjinin dünyanın manyetosferine ulaştığının sinyalidir [5]. Saat 05:00 UT’de V_p değeri 410 km/s’den 496 km/s’ye ve N_p değeri 15.9 cm^{-3} ’ten 38.5 cm^{-3} lük bir değere yükselmiştir. Aynı saatte Dst 56 nT’lık değeri ile pozitif yönde pik yapar. Fırtınayı tanımlamak için kullanılan diğer bir indis olan Dst indisinin, benzer bazı çalışmalarda da ifade edildiği gibi, güneye yönelmeden önce pozitif yönde bir artış sergilemesi ani bir fırtına başlangıç olayını işaret eder [17, 21, 22]. Dst ’nin pozitif olması solar rüzgâr basınç artışından dolayı manyetosferin sıkışmasını ifade eder. Bu saat jeomanyetik fırtınanın başlangıç fazını (dikey kesikli çizgi), yani ani fırtına yükselmesini (SSC-sudden storm commencement) veya aşamalı artışı (GC-gradual commencement) gösterir.



Şekil 1. 14-20 Mart 2015 tarihleri arası jeomanyetik ve solar parametrelerin zamana göre değişimi. (a), (b) ve (c) panelleri sırasıyla jeomanyetik fırtınanın tanımlanması için kullanılan A_p , Dst ve K_p indislerini gösterir.

Buna karşın (d), (e) ve (f) panelleri solar parametrelerden sırasıyla proton hızını (V_p), yoğunluğunu (N_p) ve gezegenler arası manyetik alanı (B_z -GSE) temsil eder. (g) ve (h) IRI-2012-TEC ve IONOLAB-TEC değerlerinin zamanla değişimini gösterir.

Saat 05:00UT'den sonra Bz güneye yönelir ve saat 08:00 UT -14 nT lık değer ile güney yönünde pik yapar. Bu ani yön değiştirme daha önceki çalışmalarda da ifade edildiği gibi fırtınanın ana fazının başlamasına işaret eder (kesikli çizgi ile kesikli noktalı çizgi arası) [5, 17]. Aynı saatte Dst -43 nT, Kp 5.7 ve Ap 67 nT değerindedir. Daha sonra Bz tekrar kuzeye yönelir ve saat 10 UT'de 11.7 nT lık değeri ile ikinci pik değerini alır. Bu saatte Kp= 5.3, Ap= 56 nT ve Dst = 63 nT lık değerlere sahiptir. Son olarak Bz tekrar güneye yönelir ve saat 14:00 UT'de -24.1 nT lık değer ile güney yönünde ikinci pik değerine sahip olur. Saat 14:00 UT'de Kp 7.7= Ap= 179 ve Dst = -81 nT'lık değerler ile fırtınanın habercisi olurlar. Saat 14:00'dan sonra Bz azalmaya başlar. Jeomanyetik fırtınayı tanımlamak için kullanılan tüm bu değerler yukarıda verilen referans değerlerini aşmaktadır. Bu durum jeomanyetik fırtınanın olduğuna işaret eder. Gece saat 22:00 UT'de jeomanyetik indisler Dst=-223 nT, Kp=8 ve Ap= 179 nT lık değerlerle şiddetli manyetik fırtınanın olduğunu işaret eder. Dst değerindeki bu azalma halka akımının önemli bir atışını temsil eder [17, 45]. Bu saatten sonra Dst indisi yükselmeye başlar ve bu durum fırtınanın geri dönüş fazını (kesikli noktalı çizgi ile düz çizgi arası) temsil eder. Fırtınanın başlamasından 84 saat sonra bile Dst değeri yaklaşık -50 nT'lık değeri ile hala başlangıç değerine ulaşmadığı görülmektedir.

3.1.2. Fırtına 1 süresince TEC değişimleri

17 Mart 2015 jeomanyetik fırtınasını kapsayan 14-20 Mart 2015 dönemi süresince IONOLAB-TEC değerlerinin değişimini Şekil 1-g'ta gösterilmiştir. Jeomanyetik fırtınanın başlamasından önceki günler (14-16 Mart) IONOLAB-TEC değerlerinde çok ani değişimler gözlenmemektedir. Bununla birlikte bir önceki günden ortalama 5 TECU luk sapma meydana gelmektedir. Jeomanyetik fırtınanın başlangıç aşamasında (saat 05:00 UT'de) IONOLAB-TEC değerleri lineer olarak artmaya devam etmiştir. Manyetik fırtınanın başlangıç fazında TEC değerlerinde meydana gelen benzer ani artışlar daha önce yapılan çalışmalarda da ifade edilmiştir [5, 6, 9, 15, 16,46]. Fırtınanın ana fazının ilk

saatlerinde IONOLAB-TEC değerleri artmaya devam etmiş ve saat 12:00 UT'de 64 TECU'luk maksimum değerine ulaşmıştır. Ana fazın ilerleyen saatlerinde TEC değerleri azalmaya başlamış fırtınanın en şiddetli olduğu gece saat 22:00 UT'de minimum değerler almıştır ve ilerleyen birkaç saat azalmaya devam etmiştir.

Gece saat 22:00 UT'den sonra fırtınanın geri dönüş fazı başlamıştır. Geri dönüş fazının ilk saatlerinde TEC değerleri azalmaya devam etmiş ve 18 Mart 03:00 UT'de 7 TECU luk minimum değerini almıştır. Daha sonra TEC değerleri artmaya başlamış 18 Mart saat 12:00 UT fırtınadan önceki değerlerine ulaşmıştır. Ancak fırtına günündeki maksimum değerinin çok altına düşmüştür. Bu düşüş 19 Mart günü devam etmiş ve maksimum TEC değeri 24 TECU ya kadar azalmıştır. 20 Mart'ta TEC değerlerinde bir önceki güne nazaran bir artış olmasına rağmen, fırtına öncesindeki değerlere kıyasla bir azalma vardır. Özellikle fırtınanın sonrasındaki günlerde TEC değerlerin belirgin bir azalma meydana gelmiştir. Fırtınayı takip eden günler TEC değerlerinde azalmalar meydana gelmesi orta enlem çukurunun ekvatora doğru hareketinden dolayı olduğu ifade edilmiştir [46]. Ayrıca, literatürde fırtınanın sonrasındaki günler TEC değerlerinde meydana gelen ani azalmaların, iyonkürede bir bileşim değişiminden kaynaklanan fırtına negatif fazını temsil ettiği de ifade edilmiştir [46, 47]. Dahası, orta enlemlerde gözlenen negatif tedirginliklerin termoküreye ait nötr bileşen oranının (N_2/O , moleküler nitrojenin atomik oksijene oranı) artması ile ilişkili olduğuna da inanılır[48, 49]. IONOLAB-TEC değerlerinin 14-20 Mart 2015 tarihlerindeki değişimi, diğer bir iyonküreye ait parametre olan foF2 ile jeomanyetik fırtınaların ilişkisini inceleyen bir çalışmada [49] ifade edildiği gibi, orta enlemde jeomanyetik fırtına süresince pozitif fırtına etkilerinin fırtınanın başlangıç fazında, negatif fırtına etkilerinin fırtınanın geri dönüş fazında gözlemlendiğini sonucunu doğrular.

Şekil 1-h 17 Mart 2015 jeomanyetik fırtınasını kapsayan 14-20 Mart 2015 dönemi süresince IRI-2012-TEC değerlerinin değişimini gösterir. Şekilden de görüleceği üzere 17 Mart 2015 şiddetli jeomanyetik fırtınanın tüm fazlarında (başlangıç, ana ve geri dönüş) IRI-2012

ile elde edilen TEC değerlerinde herhangi bir tedirginlik meydana gelmemiştir. IRI-2012-TEC değerleri burada çalışılan zaman periyodunda benzer bir dağılım sergilemiştir. Tüm günler için TEC maksimum değerleri ortalama 38 TECU ya ulaşmıştır.

IONOLAB-TEC ve IRI-2012-TEC değerleri arasındaki korelasyon analizi sonucunda korelasyon katsayıları fırtına öncesi (14 Mart 00:00 UT-17 Mart 04:00 UT) $R = 0.98$, fırtına sırasında (17 Mart 05:00 UT-18 Mart 20:00 UT) $R = 0.85$ ve fırtına sonrasında (18 Mart 21:00 UT-20 Mart 23:00 UT) $R = 0.95$ olarak bulunmuştur.

Fırtına süresinde korelasyon katsayısının diğer durumlara (fırtına öncesi ve sonrası) nazaran azaldığı görülmektedir. Bu azalma fırtına süresince iyonkürede meydana gelen tedirginliklere IONOLAB-TEC değerlerinin duyarlılığını IRI-2012-TEC değerlerinin ise duyarsızlığını gösterir. Yani, fırtına öncesi neredeyse aynı oranda ($R = 0.98$) değişen IONOLAB ve IRI-TEC değerleri arasındaki korelasyon katsayısının fırtına sırasında azalması ($R = 0.85$) jeomanyetik fırtınaya IONOLAB-TEC değerlerinin değişmesinden kaynaklanır. Korelasyon katsayısı fırtınadan sonra IONOLAB-TEC değerleri ile IRI-TEC değerleri aynı oranda değişmeye başladığından tekrar yükselmiştir ($R = 0.95$).

3.2. Fırtına 2 için sonuçlar

3.2.1. Fırtına 2 süresince solar ve jeomanyetik indislerin değişimi

Şekil 2’de (a)-(c), sırasıyla A_p , D_{st} , K_p indislerinin (d)-(f) ise V_p , N_p ve B_z ’nin zamana göre değişimi göstermektedir. 22 Haziran 17:00 UT’de B_z güneye yönelmiş ve değeri -2.1 nT iken saat 19:00 UT’de ani bir artışla -26.3 nT’lık pik değerine ulaşmıştır. Bir önceki fırtınada olduğu gibi bu saat SSC veya GC yi ifade eder (dikey kesikli çizgi). B_z ’de güney yönündeki ani artış daha önceki çalışmalarda da ifade edildiği gibi fırtınanın başlamasına işaret eder [5, 17]. Aynı süreçte $K_p=8.3$, $A_p=236$ nT iken D_{st} değeri -9 nT’dan -53 nT lık değerine ulaşmıştır. Bu saatte N_p değeri 24.4 N/cm^3 ten 49.9 N/cm^3 lük değere, proton hızı ise 515 km/s ’den 675 km/s ye

yükselmiştir. B_z ’nin güney yönünde devam ettiği günde N_p ve V_p de meydana gelen artışlar şiddetli fırtınanın habercisidir [50]. Daha sonra B_z yön değiştirerek kuzeye yönelir ve kuzey yönünde 20:00 UT’de 12.1 nT’lık pik değerine ulaşır. Aynı saatte D_{st} -121 nT lık değere sahiptir. B_z değeri 23 Haziran günü saat 01:00 UT’de tekrar güneye yönelir ve saat 02:00 UT’da -23.1 nT lık bir değere ulaşır. Aynı saatlerde D_{st} değeri azalarak saat 04:00 UT’de -204 nT’lık değeri ile negatif yönde maksimuma ulaşır. Bu saatlerde N_p değeri azalırken V_p değeri yükselir. Bu durum fırtınanın ana fazın bittiğini gösterir (kesikli çizgi ile kesikli iki noktalı çizgi arası). Bu saatten sonra B_z tekrar kuzeye yönelir ve yaklaşık olarak 30 saat sonra fırtınadan önceki duruma döner. Bununla birlikte D_{st} değeri yükselmeye başlar, ancak fırtınadan sonraki günler ortalama -65 nT lık değerler ile başlangıç değerlerine dönememiştir. Böylece fırtınanın geri dönüş fazına (kesikli iki noktalı çizgi ile düz çizgi arası) girilmiş olur.

3.2.2. Fırtına 2 süresince TEC değişimleri

22-23 Haziran 2015 şiddetli jeomanyetik fırtınasını süresince IONOLAB-TEC değerlerinin değişimi Şekil 1-g’de gösterilmiştir. Jeomanyetik fırtınanın başlamasından önceki günler (19-21 Haziran) IONOLAB-TEC değerlerinde bir önceki güne nazaran değişimler mevcuttur. Jeomanyetik fırtınanın başlangıç fazında olduğu gün (22 Haziran) IONOLAB-TEC değerlerinde bir önceki güne nazaran artış meydana gelmiş ve saat 11:00 UT’de yaklaşık 40 TECU luk maksimum değere ulaşmıştır.

Fırtınanın ana fazı 22-23 Haziran 2015 tarihlerinde gece saatlerinde meydana gelmiştir. Fırtınanın ana fazında IONOLAB-TEC değerlerinin genellikle azaldığı görülmektedir. Bu sonuç jeomanyetik fırtınaya iyonküreye ait tepkiyi diğer bir iyonküreye ait parametre olan f_oF_2 deki değişimi inceleyerek araştıran Adewale [49]’ün sonucu ile örtüşmektedir. Çünkü jeomanyetik fırtınalar süresince TEC değerlerindeki değişim genellikle F_2 bölgesi elektron yoğunluğundaki tedirginlik ile açıklanır [17, 49].

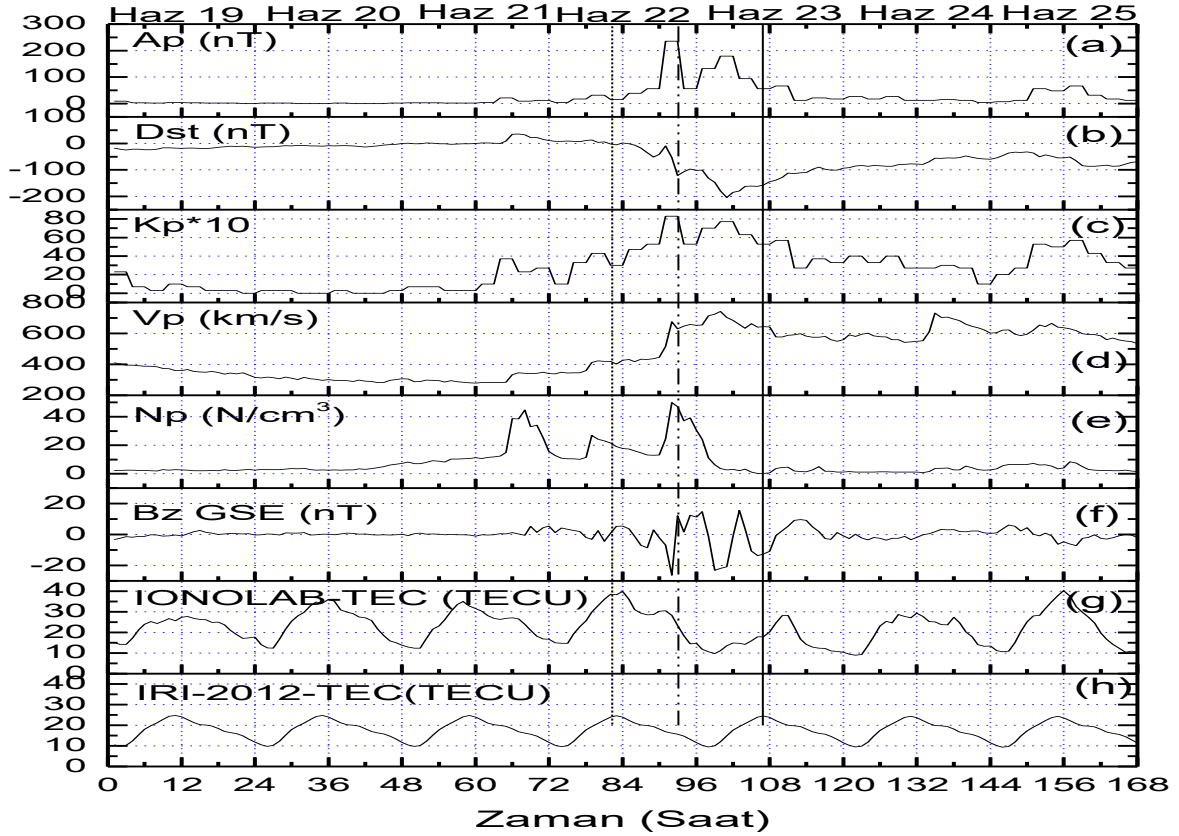
Fırtınanın geri dönüş fazında TEC değerleri 23 Haziran’da maksimum 28 TECU, 24

Haziran'da 29 TECU luk değerler almıştır. Bu değerlerin ardından 25 Haziran'da TEC değerleri önemli derecede yükselerek yaklaşık 40 TECU'luk bir değere ulaşmıştır. Fırtınanın geri dönüş fazında TEC değerlerindeki azalma, jeomanyetik fırtına olayları süresince negatif fırtına etkilerinin geri dönüş fazında meydana geleceğini ifade eden Adewale [49]'ün çalışmasını destekler.

Şekil 2-h 22-23 Haziran 2015 şiddetli jeomanyetik fırtınasını kapsayan 19-25 Haziran 2015 dönemi süresince IRI-2012-TEC değerlerinin değişimini gösterir. Şekilden de görüleceği üzere 22-23 Haziran 2015 jeomanyetik fırtınasının başlangıç, ana ve geri dönüş fazlarının hepsinde IRI-2012-TEC değerlerinde herhangi bir

tedirginlik meydana gelmemiştir. Tüm günler için TEC değerleri ortalama 25 TECU luk maksimum değerlere ulaşmıştır. Her iki fırtına süresince TEC değişimleri karşılaştırıldığında, 22-23 Haziran 2015 tarihindeki fırtına dönemindeki hem IRI-2012 hem de IONOLAB TEC değerlerinin 17 Mart 2015 deki TEC değerlerinden küçük olduğu görülmektedir. Her iki fırtına döneminde de IRI-2012 modelinin fırtına öncesinde TEC değerlerini eksik tahmin ederken fırtınanın geri dönüş fazında, 25 Haziran hariç, fazla tahmin ettiği görülmektedir.

17 Mart'taki fırtına sürecinde IONOLAB-TEC değerlerinin jeomanyetik fırtınaya tepkisinin 22-23 Haziran'dakilerden daha belirgin olduğu söylenebilir.



Şekil 2. 19-25 Haziran 2015 tarihleri arası jeomanyetik ve solar parametrelerin zamana göre değişimi. (a), (b) ve (c) panelleri sırasıyla jeomanyetik fırtınanın tanımlanması için kullanılan Ap, Dst ve Kp indislerini gösterir. Buna karşın (d), (e) ve (f) panelleri solar parametrelerden sırasıyla proton hızını (V_p), yoğunluğunu (N_p) ve gezegenler arası manyetik alanı (B_z -GSE) temsil eder. (g) ve (h) IRI-2012-TEC ve IONOLAB-TEC değerlerinin zamanla değişimini gösterir.

Ayrıca, bu fırtınalar IONOLAB-TEC değerleri göre, benzer bir çalışmada da [9] ifade edildiği, pozitif iyonosferik fırtınaya bir örnektir. Pozitif iyonküreye ait fırtınalar uydu iletişimi ve navigasyonunda zaman gecikmesi, menzil hatası ve sintilasyon gibi ciddi problemlere sebep olabilir. Bu fırtınaların doğu yönlü aniden nüfuz eden elektrik alanlar (prompt penetration electric fields-PPEFs) ve ekvator yönündeki nötr rüzgarlardan kaynaklandığı bildirilmiştir [9]. Bununla birlikte, orta enlemlerde pozitif iyonküreye ait fırtınaların seyahat eden atmosferik tedirginlikler (TADs) tarafından üretildiğine inanılır [49]. Ayrıca, şiddetli jeomanyetik fırtınalar süresince kutup iyonküresine bir enerji girişi vardır ve fırtına boyunca iç manyetoküreye ait akımlar yüksek enlemlerden orta ve düşük enlemlere doğru perdelenmediğinden dolayı, elektrik alanları yüksek enlemlerden orta ve düşük enlemlere nüfuz ederler. Böyle bir enerji girişi ile orta enlemde meydana gelen fırtınadan sonraki günler TEC değerlerindeki azalma fırtınayla indüklenen kompozisyon değişikliklerinin iyonkürenin kimyasal türlerinin değişimine yol açmasından kaynaklanabilir [5]. Bu çalışmada elde edilen sonuç da benzer bir etkiye atfedilebilir.

IONOLAB-TEC ve IRI-2012-TEC değerleri arasındaki korelasyon analizi sonucunda korelasyon katsayıları fırtına öncesi (19 Haziran 00:00 UT-22 Haziran 16:00 UT) $R = 0.93$, fırtına sırasında (22 Haziran 17:00 UT-23 Haziran 20:00 UT) $R = 0.44$ ve fırtına sonrasında (23 Haziran 21:00 UT-25 Haziran 23:00 UT) $R = 0.92$ olarak bulunmuştur. Fırtına süresinde korelasyon katsayısının diğer durumlara (fırtına öncesi ve sonrası) nazaran azaldığı görülmektedir. Bu azalma fırtına süresince iyonkürede meydana gelen tedirginliklere IONOLAB-TEC değerlerinin duyarlılığını IRI-2012-TEC değerlerinin ise duyarsızlığını gösterir. Fırtına sırasında korelasyon katsayısının bu ani düşüşün (R değeri 0.93'dan 0.44'e düştüğü) fırtınanın etkisiyle IONOLAB-TEC değerlerinin değişmesinden kaynaklandığı söylenebilir. Çünkü Şekil 2'de gösterildiği gibi IRI-2012-TEC değerlerinde fırtına sırasında değişiklik olmamıştır.

4. Sonuçlar

2015 yılının Mart ve Haziran aylarında meydana gelen şiddetli jeomanyetik fırtınaya TEC modellerinin hassasiyetini ve orta enlem iyonkürasının tepkisini araştırdığımız bu çalışmada aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

1. Fırtına 1 ve 2 sırasında IONOLAB TEC değerleri şiddetli manyetik fırtınalar nedeniyle artar.
2. Her iki şiddetli manyetik fırtınadan önceki ve sonraki IONOLAB-TEC değerlerindeki değişiklikler, iyonküredeki pozitif fırtına etkilerinin fırtınaların başlangıç ve ana safhalarındayken negatif fırtına etkilerinin fırtınaların iyileşme safhalarında olduğunu göstermektedir.
3. IONOLAB tahmin yönteminin iyonküredeki bozulmalara karşı IRI-2012 modelinden daha duyarlı olduğu söylenebilir.
4. IRI modelinin fırtınanın başlangıç ve ana aşamasında IONOLAB tahmin yöntemine kıyasla TEC değerlerini daha düşük tahmin ettiği, fırtınanın iyileşme aşamasında ise daha yüksek tahmin ettiği söylenebilir. Bu sonuç önceki çalışma ile tutarlıdır [49].
5. IONOLAB-TEC değerlerinin fırtına sırasında meydana gelen değişikliklere IRI-2012-TEC değerlerinden daha duyarlı olduğu söylenebilir, zira her iki fırtınanın korelasyon analizinde fırtınadan önceki ve sonraki korelasyon katsayısının fırtına sırasındakinden daha büyük olduğu bulunmuştur.

Sonuç olarak, ampirik olarak iyonküreye ait birçok parametrenin, özellikle elektron yoğunluğunun, aylık ortalamalara dayalı olarak tahmin edildiği IRI-2012 modelinin (www.iri.org) jeomanyetik fırtınada meydana gelen iyonosferik bozulmaları tespit etmesi için daha hassas bir hale getirilmesi gereklidir. Ayrıca, hem şiddetli jeomanyetik fırtınalar sırasında pozitif ve negatif iyonküresel fırtınalarının etkilerini hem de IRI modelinin ve IONOLAB tahmini yönteminin şiddetli jeomanyetik fırtınalarına tepkilerini belirlemek için farklı

enlemlerde daha fazla araştırmalar yapmak gereklidir.

Teşekkür

Jeomanyetik ve güneş indeksleri için OMNIWeb servisine, IRI modelini sağladığı için IRI çalışma grubuna ve GPS verileri için IONOLAB grubuna teşekkür ederim.

5. Kaynaklar

1. Atıcı, R. and Sağır, S. (2017). The effect of QBO on foE. *Adv. Space Res.* **60**(2): 357-362.
2. Atıcı, R. and Sağır, S. (2016). The Effect on Sporadic-E of Quasi-Biennial Oscillation. *J. Phys. Sci. App.* **6**:10-7.
3. Atıcı, R., Güzel, E., Canyılmaz, M. and Sağır, S. (2016). The effect of lightning-induced electromagnetic waves on the electron temperatures in the lower ionosphere. *Kuwait J. Sci.* **43**:143-9.
4. Canyılmaz, M. Atıcı R. and Guzel E. (2013). The Effect of Earth's Magnetic Field on the HF Radio Wave Modes at the Heated Subionosphere. *Acta Phys.Pol. A* **123**:786-90.
5. Adebisi, S.J., Adimula, I.A., Oladipo, O.A., Joshua, B.W., Adebisi, B.O. and Ikubanni, S.O. (2014). Ionospheric response to magnetic activity at low and mid-latitude stations. *Acta Geophys.* **62**:973-89.
6. Lastovicka, J. (2002). Monitoring and forecasting of ionospheric space weather - effects of geomagnetic storms. *J Atmos Sol-Terr Phy* **64**:697-705.
7. Liu, L.B., Wan, W.X., Ning, B.Q., Yuan, H. and Liu, J.Y. (2002). Low latitude ionospheric effects near longitude 120 degrees E during the great geomagnetic storm of July 2000. *Sci China Ser A* **45**:148-55.
8. Liu, L.B., Wan, W.X., Zhang, M.L. and Zhao, B.Q. (2008). Case study on total electron content enhancements at low latitudes during low geomagnetic activities before the storms. *Ann Geophys-Germany*, **26**:893-903.
9. Lopez-Montes, R., Pérez-Enríquez, R., Araujo-Pradere, E.A. and Cruz-Abeyro, J.A.L. (2015). Fractal and wavelet analysis evaluation of the mid latitude ionospheric disturbances associated with major geomagnetic storms. *Adv. Space Res.* **55**:586-96.
10. Yue, X.N., Wang, W.B., Lei, J.H., Burns, A., Zhang, Y.L., et al. 2016. Long-lasting negative ionospheric storm effects in low and middle latitudes during the recovery phase of the 17 March 2013 geomagnetic storm. *J Geophys Res-Space*, **121**:9234-49.

11. Purohit, P., Mansoori, A.A., Khan, P.A., Atulkar, R., Bhawre, P., et al. Evaluation of geomagnetic storm effects on the GPS derived Total Electron Content (TEC). *Proc. Journal of Physics: Conference Series*, 2015, 640:012072: IOP Publishing.
12. Rastogi, R.G. (1977). Geomagnetic storms and electric fields in the equatorial ionosphere. *Nature*, **268**(5619): 422-424.
13. Kikuchi, T., Hashimoto, K., Kitamura, T.I., Tachihara, H. and Fejer, B. (2003). Equatorial counterelectrojets during substorms. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* **108** (A11).
14. Fejer, B.G., Jensen, J.W., Kikuchi, T., Abdu, M.A., and Chau, J.L. (2007). Equatorial ionospheric electric fields during the November 2004 magnetic storm. *J Geophys Res-Space* **112** (A10).
15. Joshua, B., Adeniyi, J., Adimula, I., Abbas, M. and Adebisi, S. (2011). The effect of magnetic storm of May 2010 on the F2 layer over the Ilorin ionosphere. *World J. Young Res* **1**:71.
16. Adeniyi, J.O. (1986). Magnetic Storm Effects on the Morphology of the Equatorial F2-Layer. *J Atmos Terr Phys* **48**:695-702.
17. D'ujanga, F., Baki, P., Olwendo, J. and Twinamasiko, B. (2013). Total electron content of the ionosphere at two stations in East Africa during the 24–25 October 2011 geomagnetic storm. *Adv. Space Res.* **51**:712-21.
18. Alçay, S. and Öztan, G. (2016). Manyetik Fırtınalı ve Fırtınasız Günlerde IRI-PLAS ve IRI-2012 Modellerinin TEC Kestirim Performanslarının İncelenmesi. *Electronic J. Map Technologies*, **8**(2): 131-140.
19. Rao, P.V.S.R., Krishna, S.G., Niranjan, K and Prasad, D.S.V.V.D. (2006). Temporal and spatial variations in TEC using simultaneous measurements from the Indian GPS network of receivers during the low solar activity period of 2004-2005. *Ann Geophys-Germany* **24**:3279-92.
20. Yizengaw, E., Moldwin, M., Galvan, D., Iijima, B., Komjathy, A. and Mannucci, A. (2008). Global plasmaspheric TEC and its relative contribution to GPS TEC. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phy.* **70**:1541-8.
21. De Jesus, R., Sahai, Y., Guarnieri, F., Fagundes, P., De Abreu, A., et al. (2012). Ionospheric response of equatorial and low latitude F-region during the intense geomagnetic storm on 24–25 August 2005. *Adv. Space Res.* **49**:518-29.

22. de Jesus, R., Fagundes, P.R., Coster, A., Bolaji, O.S., Sobral, J.H.A., et al. (2016). Effects of the intense geomagnetic storm of September-October 2012 on the equatorial, low- and mid-latitude F region in the American and African sector during the unusual 24th solar cycle. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phy.* **138**:93-105.
23. de Abreu, A., Martin, I., Fagundes, P., Venkatesh, K., Batista, I., et al. (2017). Ionospheric F-region observations over American sector during an intense space weather event using multi-instruments. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phy.* **156**:1-14.
24. de Abreu, A.J., Fagundes, P.R., Gende, M., Bolaji, O.S., de Jesus, R. and Brunini, C. (2014). Investigation of ionospheric response to two moderate geomagnetic storms using GPS-TEC measurements in the South American and African sectors during the ascending phase of solar cycle 24. *Adv. Space Res.* **53**:1313-28.
25. Klimenko, M.V., Klimenko, V.V., Bessarab, F.S., Ratovsky, K.G., Zakharenkova, I.E., et al. 2015. Influence of geomagnetic storms of September 26-30, 2011, on the ionosphere and HF radiowave propagation. I. Ionospheric effects. *Geomagn Aeronomy+* **55**:744-62.
26. Mukherjee, S., Sarkar, S., Purohit, P., Gwal, A. 2010. Effect of geomagnetic storms in the Equatorial Anomaly Region observed from ground based data. *International J. Geomatics-Geosci.* **1**:477.
27. Manju, G., Pant, T.K., Ravindran, S. and Sridharan, R. (2009). On the response of the equatorial and low latitude ionospheric regions in the Indian sector to the large magnetic disturbance of 29 October 2003. *Proc. Ann. Geophys- Atmos. Hydr.* **27**:2539.
28. Bilitza, D. (2001). International Reference Ionosphere 2000. *Radio Sci.*, **36**:261-75.
29. Arikan, F., Nayir, H., Sezen, U. and Arikan, O. (2008). Estimation of single station interfrequency receiver bias using GPS-TEC. *Radio Sci.*, **43**.
30. Arikan, F., Erol, C.B. and Arikan, O. (2003). Regularized estimation of vertical total electron content from Global Positioning System data. *J. Geophys. Res-Space*, **108**.
31. Eftaxiadis, K., Cervera, M.A. and Thomas, R.M. (1999). A Global Positioning System Receiver for Monitoring Ionospheric Total Electron Content, DTIC Document.
32. Bilitza, D. (2003). International reference ionosphere 2000: Examples of improvements and new features. *Description of the Low Latitude and Equatorial Ionosphere in the International Reference Ionosphere* **31**:757-67.
33. Nava, B., Coisson, P. and Radicella, S.M. (2008). A new version of the NeQuick ionosphere electron density model. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phy.* **70**:1856-62.
34. Coisson, P., Radicella, S.M., Nava, B. and Leitinger, R. (2008). Low and equatorial latitudes topside in NeQuick. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phy.*, **70**:901-6.
35. Tariku, Y.A. (2015). TEC prediction performance of the IRI-2012 model over Ethiopia during the rising phase of solar cycle 24 (2009-2011). *Earth Planets Space* **67**.
36. Kumar, S. (2016). Performance of IRI-2012 model during a deep solar minimum and a maximum year over global equatorial regions. *J Geophys Res-Space* **121**:5664-74.
37. Adebisi, S.J., Adimula, I.A., Oladipo, O.A. and Joshua, B.W. (2016). Assessment of IRI and IRI-Plas models over the African equatorial and low-latitude region. *J Geophys Res-Space* **121**:7287-300.
38. Chakraborty, M., Kumar, S., De, B.K. and Guha, A. (2015). Effects of geomagnetic storm on low latitude ionospheric total electron content: A case study from Indian sector. *J Earth Syst Sci* **124**:1115-26.
39. Themens, D.R. and Jayachandran, P.T. (2016). Solar activity variability in the IRI at high latitudes: Comparisons with GPS total electron content. *J Geophys Res-Space* **121**:3793-807.
40. Li, S.H., Li, L.H. and Peng, J.H. (2016). Variability of Ionospheric TEC and the Performance of the IRI-2012 Model at the BJFS Station, China. *Acta Geophys* **64**:1970-87.
41. Akala, A.O., Somoye, E.O., Adewale, A.O., Ojutalayo, E.W., Karia, S.P., et al. (2015). Comparison of GPS-TEC observations over Addis Ababa with IRI-2012 model predictions during 2010-2013. *Adv. Space Res.* **56**:1686-98.
42. Kurt, K., Yeşil, A., Sağır, S. and Atici, R. (2016). The Relationship of Stratospheric QBO with the Difference of Measured and Calculated NmF2. *Acta Geophys.* **64**:2781-93
43. Sezen, U., Arikan, F., Arikan, O., Ugurlu, O. and Sadeghimorad, A. (2013). Online, automatic, near-real time estimation of GPS-TEC: IONOLAB-TEC. *Space Weather* **11**:297-305.
44. Knyazeva, I.S., Makarenko, N.G., Kuperin, Y.A. and Dmitrieva, L.A. (2016). The new approach for dynamical regimes detection in geomagnetic time series. *J Phys Conf Ser.*, **675**.
45. Basu, S., Basu, S., Rich, F., Groves, K., MacKenzie, E., et al. (2007). Response of the equatorial ionosphere at dusk to penetration electric fields during intense magnetic storms. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* **112**.

46. Basu, S., Basu, S., Groves, K., Yeh, H.C., Su, S.Y., et al. (2001). Response of the equatorial ionosphere in the South Atlantic region to the great magnetic storm of July 15, 2000. *Geophys. Res. Lett.* **28**:3577-80.
47. Buonsanto, M.J. (1999). Ionospheric storms—A review. *Space Sci.Rev.*, **88**:563-601.
48. Adebisi, S., Adimula, I., Oladipo, O., Joshua, B., Adebisi, B. and Ikubanni, S. (2014). Ionospheric response to magnetic activity at low and mid-latitude stations. *Acta Geophys.* **62**:973-89.
49. Adewale, A. 2013. Ionospheric effects of geomagnetic storms at Hobart and comparisons with IRI model predictions. *J. Sci. Res. Dev.* **14**.
50. Knyazeva, I., Makarenko, N., Kuperin, Y., Dmitrieva, L. (2016). The new approach for dynamical regimes detection in geomagnetic time series. *Proc. J.Phys.: Conference Series*, **675**:032028: IOP Publishing.

Maddi Hasarlı Trafik Kazaları İçin Sinirsel-Bulanık Ağ Tabanlı Bir Kusur Tespit Modeli

Çiğdem ACI^a, Ali Can YILMAZ^b

^a Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Mersin Üniversitesi, 33343, Mersin, Türkiye
caci@mersin.edu.tr

^b Motorlu Araçlar ve Ulaştırma Teknolojileri Bölümü, Çukurova Üniversitesi, 01330, Adana, Türkiye

(Geliş/Received: 06.03.2017; Kabul/Accepted: 27.07.2017)

Özet

Maddi hasarlı bir trafik kazası meydana geldiğinde, kazaya dahil kişilerin tümü, yetkili ve görevli kişinin gelmesine lüzum görmezlerse, bunu aralarında yazılı olarak saptamak sureti ile kaza yerinden ayrılabilirler. Kazaya dahil kişiler kendi aralarında anlaşamaz ise tarafların kayıplarının tazmin edilmesi için kusur oranlarının belirlenmesinin önemi büyüktür. Son yıllarda trafik kazalarıyla ilgili hazırlanan bilirkişi raporları incelendiğinde kusur oranlarının kabaca belirlendiği, ayrıntılı kaza analizlerinin yapılmadığı görülmektedir. Bu çalışmada, karşılıklı anlaşma yoluyla çözülemeyen ve hakkında dava açılıp bilirkişi görüşüne ihtiyaç duyulan maddi hasarlı trafik kazalarında hassas kusur tespiti yapacak ANFIS (Adaptif Ağ Tabanlı Bulanık Mantık Çıkarım Sistemi) tabanlı bir model geliştirilmiştir. Türkiye İstatistik Kurumu'nun konuyla ilgili 2016 yılına kadar yapılan istatistiklerine göre, en sık görülen kaza tipleri göz önüne alınarak dört adet temel kaza senaryosu benzetim yoluyla yeniden canlandırılmıştır. Her senaryo için 500 adet veri üretilmiş, 10 katlı çapraz doğrulama ile bu verilerin %90'ı eğitim %10'u ise test için kullanılmış olup alınan sonuçlar, önceki çalışmalarda elde edilen tahmin sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Çalışmanın sonucunda ANFIS tabanlı kusur tahmin modelinin, kazaya yönelik çeşitli parametreleri değerlendirerek çok düşük hata oranları ile taraflara ait kusurları belirleyebildiği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Trafik kazası, Kusur oranı tahmini, Kaza yeniden canlandırma, ANFIS.

A Fault Detection Model Based on Neuro-Fuzzy Network for Property Damage Only Traffic Accidents

Abstract

When a property damage only traffic accident occurs, all persons involved in the accident can leave the accident area by notifying them in writing if they do not find it necessary for the authorized and responsible person to arrive. If the persons involved in the accident can not come into an agreement, it is important to determine the default rates in order to compensate the losses of the parties. When expert reports prepared for traffic accidents in recent years are examined, it is seen that fault rates are roughly determined and detailed accident analyzes are not performed. In this study, an ANFIS (Adaptive Network Based Fuzzy Logic Inference System) based model was developed to detect sensitive defaults in property damage only traffic accidents that cannot be resolved by mutual agreement and in which cases were filed and expert opinions were needed. According to statistics of the Turkish Statistical Institute until 2016, four basic accident scenarios have been simulated taking into account the most common accident types. For each scenario 500 data were generated, 90% of these data were used for training and 10% of the data were used for testing with 10-fold cross-validation and the results were compared with the prediction results obtained from previous studies. As a result of the study, ANFIS based default prediction model can be used to determine the defaults of the parties with very low error rates by evaluating various parameters for the accident.

Keywords: Traffic Accident, Fault Rate Prediction, Accident Reconstruction, ANFIS

1. Giriş

Trafik kazaları bir tür haksız fiil olup, hukuki sorumluluğu da beraberinde getirmektedir. Günlük yaşamda trafikte çıkmayan hiçbir insan

düşünülmeyeceğinden, trafik kazası her insanın başına gelebilecek olağan bir olay olarak nitelendirilmektedir. Bu nedenle, bir trafik kazasına karışan veya maruz kalan kişilerin olaydaki kusur durumlarının teknik, hukuki ve

bilimsel bir şekilde objektif olarak ortaya konulması gerekir.

Trafik kazaları ile ilgili hükümler, 2918 sayılı Karayolları Trafik Kanunu'nun [1], 81-84. maddeleri ile Karayolları Trafik Yönetmeliği'nin [2], 152-157. maddelerinde düzenlenmiştir. Trafik kazaları sonucunda, idari, cezai ve hukuki sorumluluklar doğabilmektedir. Trafik kazası gerçekleşikten sonra kazaya sebep olan kusur ve sorumluluğun ortaya çıkartılması çok önemlidir. Çünkü kusurdan dolayı karşı tarafa zarar verildiğinde; haksız fiilden doğan hukuki sorumluluk oluşur. Bu sorumluluğun da tazmin edilmesi gerekir. Kişilerin kusurları nedeniyle tazmin etmekle yükümlü olduğu zarar, zarar-kusur ilişkisine bağlıdır. Zararlar kişilerin kusurları nispetinde karşılanmak durumundadır. Zira her zarar, kusur oranında karşılandığı gibi; cezalar da kusurları oranında indirimine tabi olur [3]. Trafik kazalarında kusur ve sorumluluk oranının belirlenmesinde, bilimsel, teknik ve hukuki düzenlemelerden yararlanılması gerekir.

1 Nisan 2008 tarihinden itibaren yapılan değişiklikle, maddi hasar meydana gelen kazalarda, kazaya dahil kişilerin tümü, yetkili ve görevli kişinin gelmesine lüzum görmezlerse, bunu aralarında yazılı olarak saptamak sureti ile kaza yerinden ayrılabilirler [2]. Kaza tespit tutanağı adı verilen bu belge kazaya karışanlar tarafından doldurulup imzalanır ve sigorta kurumlarına teslim edilir. Bu işlemin ardından sigorta kurumları kazayı, Trafik Sigortaları Bilgi Merkezi [4] tarafından önceden belirlenmiş maddi hasarlı kaza senaryolarına göre inceleyip kazaya dahil olan sürücülerin kusur oranlarını %0-%100 veya %50-%50 olacak şekilde paylaştırıp, hazırladıkları belgeyi Sigorta Bilgi ve Gözetim Merkezi'ne [5] 5 iş günü içinde iletirler. Tarafların zararları, kusurları nispetinde karşılanır ve herhangi bir adli kovuşturmaya gerek kalmaz.

Kazanın sadece maddi hasarlı olarak gerçekleştiği ama tarafların anlaşılamadığı durumlarda ise araçların yeri değiştirilmeden en yakın trafik ekibi çağrılır ve "Trafik Kaza Tespit Tutanağı" düzenlenir. "Trafik Kaza Tespit Tutanağında" kusur oranı belirtilmemekte sadece "asli ve diğer kusurlar" belirtilmektedir. Bu uygulama kusur oranı tespiti için her kazadan sonra mahkeme kararı veya bilirkişi raporunu zorunlu hale getirmiştir. Trafik kazalarıyla ilgili

hazırlanan bilirkişi raporları incelendiğinde kusur oranlarının kabaca belirlendiği, ayrıntılı kaza analizlerinin yapılmadığı görülmektedir. Bunun başlıca sebebi hem teknik imkansızlık hem de mevzuat yetersizliğidir. Son yıllarda, bazı bilirkişilerin raporlarını oluştururken vCrash [6], Edge-FX [7], REC-TEC [8], Pc-Crash [9] gibi kazaların benzetim yoluyla analizini yapan paket programlar kullandığı görülmüş olsa da bahsi geçen yazılımların lisans ücretlerinin yüksek olması ve bu yazılımları kullanmanın teknik bilgi gerektirmesinden dolayı yaygınlaşmamıştır. Bununla birlikte, bilirkişiler raporlarında kaza benzetim yazılımlarını kullansalar bile kusur oranı belirleme işlemini yine kabaca yapmaktadırlar.

Kusur oranlarının kabaca belirlenmesi, kazaya karışanların ve/veya sigorta şirketlerinin haksızlığa uğramasına sebep olmaktadır. Oysa literatürde kusur oranlarının belirlenmesi ile ilgili yapılmış birçok çalışma bulunmaktadır: Cangül [10] tezinde, trafik kazalarındaki kusur oranlarını belirlemeye yarayan uzman bir sistem geliştirmiş ve kusur oranlarını etkileyen faktörler üzerine soru-cevap anketleri kullanarak değerlendirmeler yapmıştır. Bu tezde karar destek sistemi kullanılmış olup kazalar sadece araç-arac ve yaya-arac ekseninde sınıflandırılmıştır. Kazanın yeniden canlandırılması yaklaşımı yapılmamıştır. Schneider vd. [11] iki motosiklet çarpışmasında kusur oranlarının belirlenmesi üzerine yaptıkları çalışmada, motosiklet sürücülerinin arkadan çarpmalı kazalarda asli kusurlu olmalarının daha muhtemel olduğu ancak kavşak kazalarında genellikle tali kusurlu oldukları sonucuna varmışlardır. Goh vd. [12] karışık logit modelleme yaklaşımı kullanarak, yol durumu, hız limitleri, trafik/ışıklandırma şartları, sürücünün yaşı, cinsiyeti ve tecrübesi gibi yol/çevre, araç ve sürücü ilişkili değişkenlerin asli kusurluluk durumunda etkili faktörler olduğunu ortaya koymuşlardır. Sonuçlara göre, bölünmüş yolların özellikle tecrübeye bağlı kazaları büyük oranda azalttığı görülmüştür. Zhang vd.'nin [13] Çin'deki yaya-arac kazalarının şiddeti ve kusur oranları üzerine yaptıkları çalışmanın sonuçları, yayaların asli kusurlu oldukları kazalarda ölümlerin ve ciddi yaralanma vakalarının daha muhtemel olduğunu ortaya koymuştur. Islam vd. [14] Alabama'daki römorklu ve römorksuz

kamyon kazalarında asli kusurluluk üzerine yaptıkları kapsamlı çalışmada, bu tür kazalardaki yaralanmanın şiddetinin malzemenin tahmin edilen ortalama süper-elastikiyetine büyük oranda bağlı olduğu savunulmuştur. Yılmaz vd. [15], trafik kazalarında çarpışma anındaki kusurluluk durumunun anlaşılmasında doğrudan etkisi olan deformasyon enerjisini yapay zeka yöntemleri ile tahmin etmiştir. Yılmaz vd. [16], başka bir çalışmada Yapay Sinir Ağları'nı (YSA) kusur oranı tahmini için kullanmışlardır. Çalışmada, üç çeşit YSA (İleri Beslemeli Çok Katmanlı (İBÇK), Genelleştirilmiş Regresyon (GR) ve Fonksiyon Uydurma (FU)) kullanılmış olup yüksek doğrulukta tahmin sonuçları elde edilmiştir. Literatürdeki çalışmalardan anlaşılacağı üzere, trafik kazalarında kusur tespiti son yıllarda üzerinde oldukça çalışılan bir konu olsa da Sinirsel-Bulanık Ağ metodunu bu alanda kullanan bir çalışma henüz yapılmamıştır.

Bu çalışmada, Türkiye İstatistik Kurumu'nun konuyla ilgili 2016 yılına kadar yapılan istatistiklerine göre [17] en sık görülen kaza tipleri göz önüne alınarak dört adet temel kaza senaryosu benzetim yoluyla yeniden canlandırılmıştır. Kazaya karışan araçlardan elde edilen parametreler göz önüne alınıp tarafların kusur oranları Bulanık Mantık metodu ile tahmin edilmiştir. Elde edilen tahmin sonuçları önceki çalışmalarda elde edilen tahmin sonuçları Yılmaz vd. [16] ile karşılaştırılmıştır.

2. Materyal ve Metot

2.1. Veri kümesinin elde edilmesi

Çalışma materyali olarak en sık görülen kaza senaryolarından dört tanesi seçilmiş ve bu kazaların benzetimi için zeminlerin özdeş ve tam kuru olması (sürtünme katsayısı = 1), kazaların yalnızca maddi hasarlı olması, kazanın oluş şekline göre çarpışma açıları için uygun değerler alınması gibi kabuller yapılmıştır. Kaza senaryoları, vCrash [6] isimli, iki ve üç boyutlu kaza canlandırmalarının yapılabildiği bir benzetim programında yeniden canlandırılmıştır. Araçların hızları ve aldıkları deformasyonlar giriş verisi olarak kullanılırken kazaya karışanların kusur oranları çıkış verisi olarak alınmıştır. Bu bağlamda, her senaryo için 500 adet veri

üretilmiş, bu verilerin %90'ı eğitim %10'u ise test için kullanılmıştır.

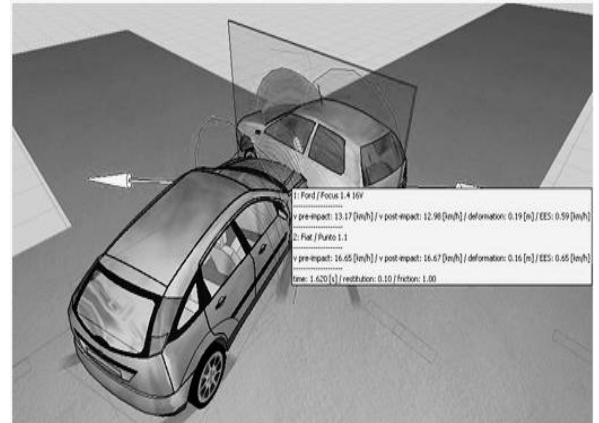
Kazalarda, çarpışma anında deformasyon enerjisine dönüşen hız ölçüsü anlamına gelen "Enerji Denklik Hızı (Energy Equivalent Speed) (EES)" önemli bir parametredir. Günümüz teknolojisine sahip araçların hemen hemen hepsi kilitlenmesiz fren sistemine (ABS) sahip olduğu için frenleme esnasında tekerlekler sürekli olarak kilitlenmemekte ve yol yüzeyinde lastik izleri araçların çarpışma hızlarını belirleyebilecek kadar oluşmamaktadır. Bu durumda, ne kadar yüksek hız, o kadar yüksek deformasyon enerjisi prensibi devreye girmektedir. Araçların EES değerleri (1)'deki gibi hesaplanır:

$$\frac{EES_1}{EES_2} = \sqrt{\frac{m_2 S_{def1}}{m_1 S_{def2}}} \text{ ve } EES_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot E_D}{m_2 \left(\frac{S_{def1}}{S_{def2}} + 1 \right)}} \quad (1)$$

Burada m_1 ve m_2 araçların "kg" cinsinden kütleleri, S_{def1} ve S_{def2} araçların çarpışma bölgelerinde oluşan deformasyon derinliklerinin "metre" cinsinden değeri, E_D ise araçların çarpışmaya bağlı olarak kaybettikleri kinetik enerjinin "Joule" cinsinden değeridir. Veri kümesi olarak kullanılan kaza senaryolarının teknik ayrıntıları aşağıda özetlenmiştir:

Senaryo 1:

Bu kazada, iki binek araç eşit kollu kavşakta (herhangi bir trafik ışığı, polis, "DUR" tabelası vs. yok) birbirlerine çarpmıştır (Şekil 1).

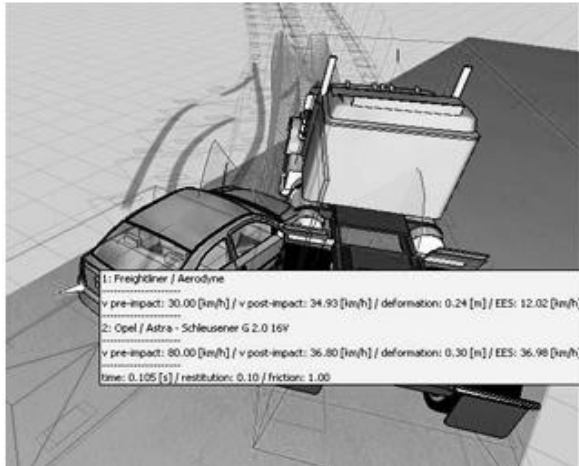


Şekil 1. Senaryo 1 için araçların birbirlerine ilk teması anındaki vCrash görüntüsü

Bu senaryoda, araçların birbirlerine dik açıda çarptıkları, araçların her ikisinin de lastiklerinin temas ettikleri yol yüzeylerinin özdeş ve tam kuru zemin olduğu (sürtünme katsayısı, $\mu = 1$), hızlar hakkında fikir verecek lastik izlerinin olmadığı, kazanın yalnızca maddi hasarlı olduğu kabul edilmiştir.

Senaryo 2:

Bu senaryoda, sağ şeritten ilerleyen bir kamyon (araç 1) sol şeritten gelen bir binek otomobilin (araç 2) önüne kırarak kazaya sebebiyet vermiştir (Şekil 2). Kamyon sürücüsü kanunun "şerit değiştirme kurallarına uymama" maddesinden %75 oranında "asli kusurlu" iken sol şeritten gelen binek araç sürücüsü "dikkatsiz araç kullanma" sebebiyle %25 oranında "tali kusurlu" kabul edilmiştir. Görüldüğü üzere, herhangi bir hız ve çarpışma analizi (soldan gelen aracın yasal hız sınırının çok üzerinde ilerlemesi gibi) yapılmadan sadece ilgili kanun dikkate alınmıştır. Bu maddi hasarlı senaryoda, yol yüzeyinin özdeş ve tam kuru olduğu ve çarpışma anında araçlar arası açının 45° olduğu kabul edilmiştir.

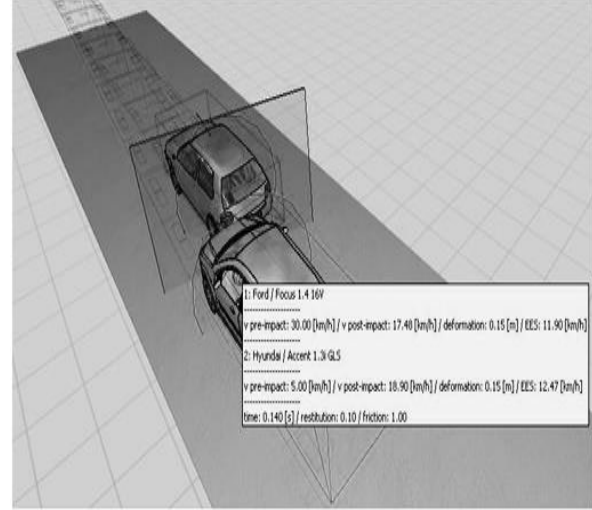


Şekil 2. Senaryo 2 için araçların birbirlerine ilk teması anındaki vCrash görüntüsü

Senaryo 3:

Bu senaryoda, yasal hız alt limitinin de altında yavaş giden bir araca (araç 1) yasal sınırlar içerisinde ilerleyen diğer bir araç (araç 2) arkadan çarpmıştır (Şekil 3). Kanuna göre arkadan çarpan araç %100 "asli kusurlu" olarak belirtilmiştir. Ancak, öndeki aracın aşırı yavaş gitmesi (yasal

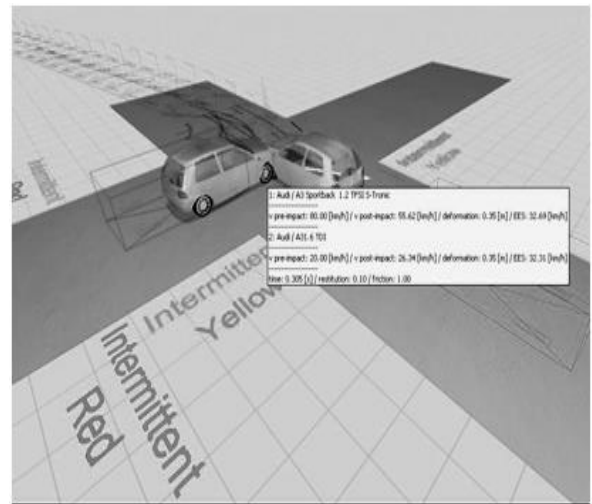
hız alt sınırının altında), arkadaki aracın yasal hız sınırları içerisinde ilerlemesi ve/veya deformasyon miktarları gibi bir durum göz önüne alınmamıştır. Bu senaryo için, zeminin özdeş ve tam kuru, araçların çarpışma esnasında aynı doğrultuda olduğu varsayılmıştır.



Şekil 3. Senaryo 3 için araçların birbirlerine ilk teması anındaki vCrash görüntüsü

Senaryo 4:

Bu senaryoda, fasıllı kırmızı ışık yönünden kavşağa giren bir araç (araç 1) ile fasıllı sarı ışık yönünden kavşağa giren bir araç (araç 2) çarpışmaktadır (Şekil 4).



Şekil 4. Senaryo 4 için araçların birbirlerine ilk teması anındaki vCrash görüntüsü

Fasılalı kırmızı tarafından gelen araç "fasılalı kırmızı ışıklı kavşağa dikkatsiz ve tedbirsiz girmek ve kavşağa yaklaşırken yavaşlamamak" durumundan %75 "asli kusurlu", diğer araç "fasılalı kırmızı sarı kavşağa dikkatsiz ve tedbirsiz girmek ve kavşağa yaklaşırken yavaşlamamak" hükmüne dayanarak ve ilgili herhangi bir analiz yapılmadan (araçların hızları gibi) %25 "tali kusurlu" olarak belirtilmiştir.

Bu senaryoda da, araçların birbirlerine dik açıda çarptıkları, araçların her ikisinin de lastiklerinin temas ettikleri yol yüzeylerinin özdeş ve tam kuru zemin olduğu (sürtünme katsayısı, $\mu = 1$), hızlar hakkında fikir verecek lastik izlerinin olmadığı, kazanın yalnızca maddi hasarlı olduğu kabul edilmiştir. Yapılan çalışmada vCrash yazılımından elde edilen verilerle ilgili açıklayıcı istatistiksel bilgiler her senaryo için sırasıyla Tablo 1, 2, 3 ve 4'te verilmiştir.

Tablo 1. Senaryo 1 için açıklayıcı istatistikler

	Deformasyon (m) (araç 1)	Deformasyon (m) (araç 2)	Hız (km/s) (araç 1)	Hız (km/s) (araç 2)	Kusur (%) (araç 1)	Kusur (%) (araç 2)
Minimum	0.072	0.065	15	20	0	18
Maksimum	1.637	1.598	170	175	82	100
Ortalama	0.849	0.774	68.818	74.108	28.028	72
Std. Sapma	0.421	0.408	37.198	36.672	26.786	26.797

Tablo 2. Senaryo 2 için açıklayıcı istatistikler

	Deformasyon (m) (araç 1)	Deformasyon (m) (araç 2)	Hız (km/s) (araç 1)	Hız (km/s) (araç 2)	Kusur (%) (araç 1)	Kusur (%) (araç 2)
Minimum	0.077	0.079	25	25	0	18
Maksimum	1.009	1.019	180	175	82	100
Ortalama	0.306	0.321	78.397	76.703	28.028	72
Std. Sapma	0.183	0.177	37.128	35.022	26.786	26.797

Tablo 3. Senaryo 3 için açıklayıcı istatistikler

	Deformasyon (m) (araç 1)	Deformasyon (m) (araç 2)	Hız (km/s) (araç 1)	Hız (km/s) (araç 2)	Kusur (%) (araç 1)	Kusur (%) (araç 2)
Minimum	0.071	0.078	50	20	51	20
Maksimum	0.895	0.958	80	35	80	49
Ortalama	0.339	0.355	66.429	20.429	66.429	33.571
Std. Sapma	0.219	0.235	11.089	9.589	7.859	7.859

Tablo 4. Senaryo 4 için açıklayıcı istatistikler

	Deformasyon (m) (araç 1)	Deformasyon (m) (araç 2)	Hız (km/s) (araç 1)	Hız (km/s) (araç 2)	Kusur (%) (araç 1)	Kusur (%) (araç 2)
Minimum	0.061	0.052	15	20	0	18
Maksimum	1.151	1.061	80	150	82	100
Ortalama	0.849	0.774	58.817	71.201	28.028	72
Std. Sapma	0.362	0.324	37.197	34.713	26.786	26.797

2.2. Adaptif tabanlı bulanık mantık çıkarım sistemi (ANFIS)

Bulanık mantık ve sinir ağları, akıllı sistemlerin geliştirilmesinde birlikte kullanılan tamamlayıcı araçlardır. YSA, ham verilerle uğraşıldığında iyi sonuçlar veren düşük seviyeli bir yapıdır. Bulanık mantık ise, uzman görüşü

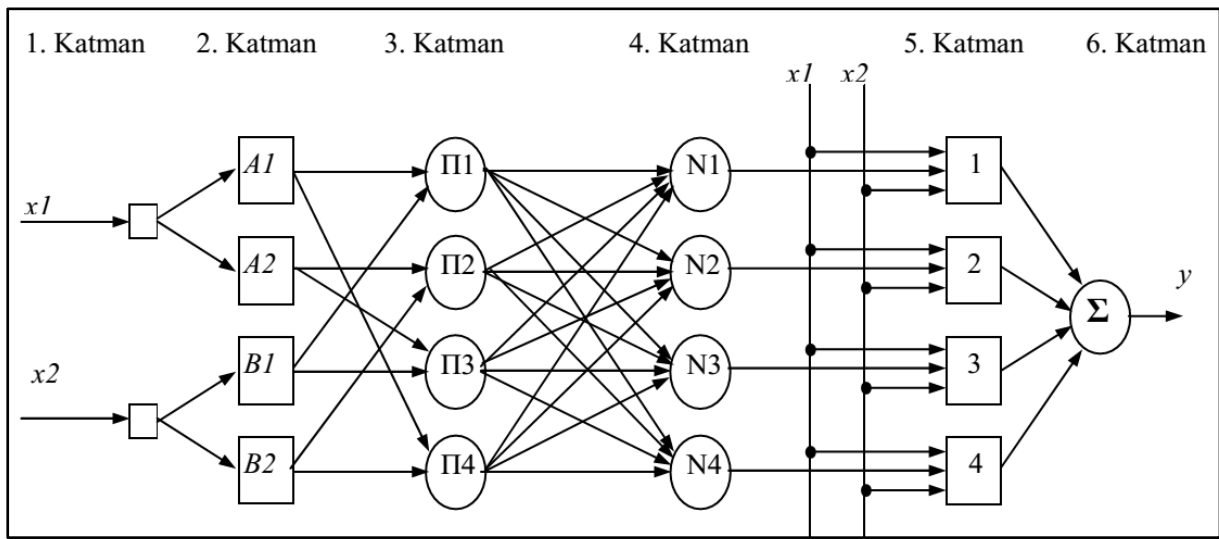
sonucu elde edilen dilsel bilgileri kullanarak daha yüksek seviyeli sonuçlar çıkarmaktadır. Aslında bulanık sistemlerin öğrenme kabiliyeti yoktur ve kendilerini yeni çevreye adapte edemezler. Diğer yandan YSA öğrenme kabiliyetine sahiptir; fakat kullanıcı tarafından anlaşılmazlar [18-19].

ANFIS (Adaptive Network based Fuzzy Inference System, Adaptif Ağ Tabanlı Bulanık

Mantık Çıkarım Sistemi) yapısı, Sugeno tipi bulanık sistemlerin, sinirsel öğrenme kabiliyetine sahip bir ağ yapısı olarak temsilinden ibarettir. Bu ağ, her biri belli bir fonksiyonu gerçekleştirmek üzere, katmanlar halinde yerleştirilmiş düğümlerin birleşiminden oluşmuştur [20].

Sinirsel bulanık sistemler, YSA'ların paralel hesaplayabilme ve öğrenme kabiliyeti ile bulanık mantığın uzman bilgisini kullanarak sonuçlar çıkarabilme özelliklerinin birleşiminden oluşur. Sonuç olarak sinirsel bulanık sistemler sayesinde YSA'lar daha anlaşılır hale gelir [21].

ANFIS, ele alınan problem için oluşturulan yapıya göre olası tüm kuralları atayabilmekte veya kuralların veriler yardımıyla uzman tarafından atanmasına olanak vermektedir. ANFIS'in kural oluşturabilmesi veya kural oluşturulmasına olanak sağlaması uzman görüşlerinden faydalanması anlamına gelmektedir. Bu nedenle birçok tahmin probleminde YSA'lara uzman görüşlerinden faydalanma imkânı tanıdığı için ortalama hata kareler kriterine göre daha iyi sonuçlar elde edilmesini mümkün kılmaktadır [22].



Şekil 5. Adaptif ağ tabanlı bulanık mantık çıkarım sistemi

ANFIS'in öğrenme algoritması, en küçük kareler yöntemi ile geri yayımlı öğrenme algoritmasının bir arada kullanılmasından oluşan melez öğrenme algoritmasıdır. ANFIS 6 katmandan oluşmaktadır (Şekil 5). ANFIS yapısındaki her katmana ait düğüm işlevleri ve katmanların işleyişi sırasıyla şöyledir [22]:

1.Katman: Giriş katmanı olarak adlandırılmaktadır. Bu katmandaki her düğümden alınan giriş sinyalleri diğer katmanlara aktarılır.

2.Katman: Bulanıklaştırma katmanı olarak adlandırılır. Giriş değerlerini bulanık kümeler ayırmada üyelik fonksiyonu olarak genelleştirilmiş Bell aktivasyon fonksiyonunu kullanılmaktadır. Burada, her bir düğümün çıkışı, giriş değerlerine ve kullanılan üyelik fonksiyonuna bağlı olan üyelik derecelerinden oluşmaktadır.

3.Katman: Kural katmanıdır. Bu katmandaki her bir düğüm, Sugeno bulanık mantık çıkarım

sistemine göre oluşturulan kuralları ve sayısını ifade etmektedir.

4.Katman: Normalizasyon katmanıdır. Bu katmandaki her bir düğüm, kural katmanından gelen tüm düğümleri giriş değeri olarak kabul etmekte ve her bir kuralın normalleştirilmiş ateşleme seviyesini hesaplamaktadır.

5.Katman: Arındırma katmanıdır. Arındırma katmanındaki her bir düğümde verilen bir kuralın ağırlıklandırılmış sonuç değerleri hesaplanmaktadır.

6.Katman: Toplam katmanıdır. Burada, 5.katmandaki her bir düğümün çıkış değeri toplanarak ANFIS sisteminin gerçek değeri elde edilir.

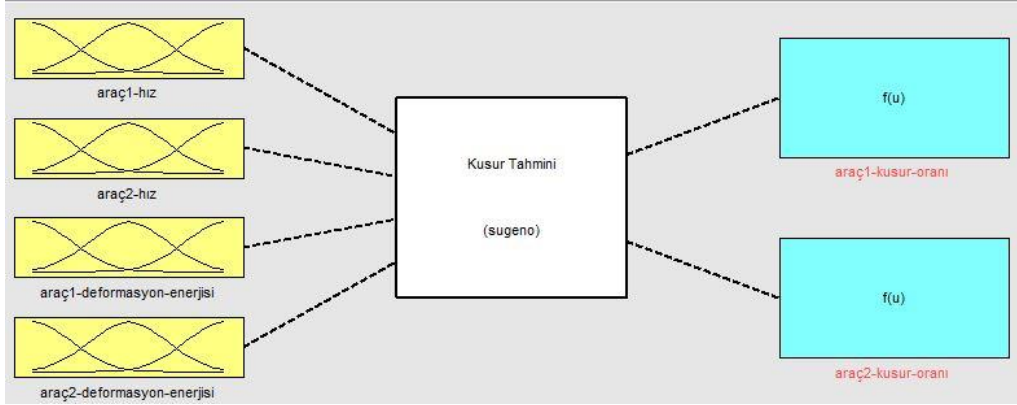
3. Sonuçlar

Trafik kazalarındaki kusur oranlarının tahminini yapacak Bulanık Mantık modeli

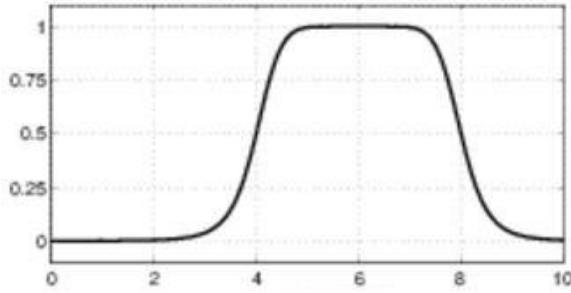
MATLAB [23] yazılımındaki ANFIS [24] arayüzü ile gerçekleştirilmiştir. Veri kümesini oluşturan ham verilere, ANFIS arayüzüne girmeden önce normalizasyon işlemi yapılmış olup tüm girdi ve çıktılar 0-1 aralığına indirgenmiştir.

Şekil 6'da da görüldüğü üzere, Sinirsel-bulanık kusur tahmin modeli tasarlanırken tüm senaryolar için Takagi-Sugeno [21] tipi bulanık model kullanılırken, üyelik fonksiyonu olarak 'gbellmf' (Şekil 7) kullanılmıştır [25]. Veriler tahmin modellerinde işlenmeden önce normalize edildiği için üyelik fonksiyonunun parametreleri de buna uygun şekilde ayarlanmıştır. Araç 1'in

hızı, Araç 2'nin hızı, Araç 1 'in deformasyon enerjisi, Araç 2'nin deformasyon enerjisi olmak üzere dört adet giriş bilgisi; Araç 1 ve Araç 2'nin kusur oranları ise çıkış bilgisi olarak kullanılmıştır. Senaryo 1 için 12 düğüm ve 4 kural, Senaryo 2 için 12 düğüm ve 6 kural, Senaryo 3 için 5 düğüm ve 2 kural, Senaryo 4 içinse 12 düğüm 8 kural kullanılmıştır. Bu değerler, yapılan denemeler sonucunda en iyi sonucu aldığımız modele göre belirlenmiştir. Tahmin modelleri ile ilgili belirtilmeyen tüm parametrelerde MATLAB ANFIS arayüzünün varsayılan değerleri kullanılmıştır.



Şekil 6. ANFIS arayüzünde tasarlanan bulanık kusur tahmin modeli.



Şekil 7. Gbellmf üyelik fonksiyonu.

Veriler 10-katlı çapraz doğrulama kullanılarak rastgele eğitim ve test kümelerine ayrılmıştır. Kusur tahmin modellerinin başarısını değerlendirmek için, korelasyon katsayısı (R), Ortalama Karesel Hata (OKH), Ortalama Mutlak Hata (OMH) ve Standart Tahminsel Hata (STH) değerlendirme kriterleri kullanılmıştır. OKH, OMH ve STH ölçüm değerleri ile model tahminleri arasındaki hata oranını belirlemek amacıyla kullanılmaktadır. Sıfıra yakın değerler, tahmin gücünün yüksek olduğunu

göstermektedir. R değeri ise gerçek gözlem değeri ile tahmin değeri arasında farkı ifade etmek için kullanılan değerdir. 0 ile 1 arasında değer alır ve bu değer 1'e yaklaştıkça tahmin modelinin doğruluğu artar. Bu kriterlerin formülleri sırasıyla Eşitlik (2), (3), (4) ve (5)'te verilmiştir.

$$R = \sqrt{1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - O_m)^2}} \quad (2)$$

$$OKH = \left[\sum_{i=1}^n \left(\frac{O_i - P_i}{n} \right)^2 \right] \quad (3)$$

$$OMH = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |O_i - P_i| \quad (4)$$

$$STH = \sqrt{1 - \frac{\sum (O_i - P_i)^2}{n}} \quad (5)$$

Burada "n" test için kullanılan veri noktalarının sayısını, "P_i" tahmin edilen değeri, "O_i" gözlemlenen değeri ve "O_m" gözlemlenen değerlerin ortalamasını göstermektedir.

Bulanık tahmin modelinden elde edilen OKH, OMH, STH ve R değerleri her senaryo için sırasıyla Tablo 5, 6, 7 ve 8'de verilmiştir.

Tablo 5. Senaryo 1 için tahmin sonuçları

Katlar	OKH	OMH	STH	R
1	0.113	0.193	0.337	1.000
2	0.026	0.110	0.161	1.000
3	0.119	0.152	0.345	1.000
4	2.821	0.527	1.680	0.998
5	0.162	0.220	0.403	1.000
6	0.142	0.180	0.376	1.000
7	0.255	0.239	0.505	1.000
8	0.245	0.212	0.495	1.000
9	0.156	0.211	0.395	1.000
10	0.076	0.151	0.275	1.000
Ortalama	0.412	0.220	0.497	1.000

Tablo 6. Senaryo 2 için tahmin sonuçları

Katlar	OKH	OMH	STH	R
1	0.352	0.314	0.593	1.000
2	0.487	0.415	0.698	1.000
3	0.345	0.339	0.587	1.000
4	9.912	0.744	3.148	0.994
5	0.211	0.265	0.460	1.000
6	0.375	0.323	0.612	1.000
7	0.530	0.347	0.728	1.000
8	0.343	0.315	0.586	1.000
9	0.482	0.300	0.694	1.000
10	0.285	0.305	0.534	1.000
Ortalama	1.332	0.367	0.864	0.999

Tablo 7. Senaryo 3 için tahmin sonuçları

Katlar	OKH	OMH	STH	R
1	0.000	0.011	0.019	1.000
2	0.000	0.000	0.000	1.000
3	0.002	0.259	0.463	0.998
4	0.000	0.000	0.000	1.000
5	0.000	0.000	0.000	1.000
6	0.007	0.481	0.861	0.995
7	0.000	0.000	0.000	1.000
8	0.000	0.000	0.000	1.000
9	0.002	0.259	0.463	0.999
10	0.000	0.000	0.000	1.000
Ortalama	0.001	0.101	0.181	0.999

Tablo 8. Senaryo 4 için tahmin sonuçları

Katlar	OKH	OMH	STH	R
1	0.659	0.333	0.812	1.000
2	0.243	0.257	0.493	1.000
3	0.245	0.213	0.495	1.000
4	0.165	0.221	0.407	1.000
5	0.242	0.229	0.492	1.000
6	0.060	0.154	0.245	1.000
7	0.467	0.269	0.683	1.000
8	0.219	0.199	0.468	1.000
9	0.056	0.148	0.237	1.000
10	0.380	0.260	0.616	1.000
Ortalama	0.274	0.228	0.495	1.000

Tablo 9'da ise YSA kullanılarak yapılan tahminden elde edilen sonuçlar [16] ile ANFIS modelinden elde edilen ortalama sonuçlar kıyaslanmıştır.

Tablo 9. ANFIS modeli ile Yılmaz vd. [16] çalışmasının kıyaslanması.

Tahmin Modeli	Senaryo 1		Senaryo 2		Senaryo 3		Senaryo 4	
	OKH	R	OKH	R	OKH	R	OKH	R
ANFIS	0.412	1.000	1.332	0.999	0.001	0.999	0.274	1.000
İBÇK	1.867	0.999	2.017	0.999	0.012	0.999	1.551	0.998
GR	2.743	0.998	2.821	0.996	0.013	0.998	0.979	0.996
FU	2.607	0.998	2.119	0.998	0.817	0.999	2.865	0.999

Elde edilen sonuçlara dayanarak aşağıdaki çıkarımlar yapılabilir:

- Tablo 5, 6, 7 ve 8 incelendiğinde en düşük hata oranının (0.000) Senaryo 3 için alındığı

görülmektedir. Bu sonucun alınmasında Senaryo 3'teki (arkadan çarpma) kusur oranlarının diğer senaryolara göre doğru tahmin etmeye daha uygun olmasından kaynaklanmaktadır.

- En yüksek hata oranları ise kusur oranlarının birbirine çok yakın olarak seyrettiği Senaryo 4'te (fasıllı kırmızı-sarı ışık çarpışması) alındığı görülmüştür. Buradaki kusur tahmini çok kritik olmasına karşın en kötü durumda bile %1'i bulmayan (0.812) STH ile kusur oranları tahmin edilmiştir.
- Kusur tahminlerinin R değerleri tüm katlar ve senaryolar için 1'e çok yakın çıkmıştır.
- Tablo 9 incelendiğinde, Yılmaz vd. [16] tarafından yapılan çalışmada geliştirilen İBÇK, GR ve FU tabanlı kusur tahmin modelleri ANFIS tabanlı modelden daha kötü sonuçlar üretmişlerdir. Tüm senaryolar için, ANFIS tabanlı modelin OKH değerleri daha düşük, R değerleri ise daha yüksek veya aynıdır. R değeri, çok küçük bir aralıkta değişiklik gösterdiğinden tahmin modelleri arasındaki fark da çok küçük olmaktadır. Önceki çalışmada performans metriği olarak sadece OKH ve R kullanıldığı için ANFIS modelinden elde edilen sonuçlar ancak bu iki metrik üzerinden kıyaslanabilmektedir.
- Tablo 9'daki Senaryo 1 sonuçları incelendiğinde, 0.412 OKH değeri ile ANFIS modeli, kendinden sonraki en iyi model olan İBÇK modelinden yaklaşık 4.5 kat daha iyi sonuçlar üretmiştir. Bu fark, GR modeli ile kıyaslandığında yaklaşık 6.5 kattır. Senaryo 2 sonuçlarında YSA tabanlı modeller birbirine çok yakın sonuçlar üretmiş olup ANFIS tabanlı model bu sonuçlardan yaklaşık 1.5 kat daha iyidir. Senaryo 3'te ise ANFIS modelinin başarısı çok ciddi boyutlardadır. Kendinden sonraki en iyi modelden 12 kat farkla daha iyi sonuçlar üretmiştir. Senaryo 4'te ise bu değer yaklaşık 3.5 kattır.
- Yukarıdaki kıyaslamalardan da anlaşılmaktadır ki Bulanık Mantık ile YSA'nın birlikte kullanımı, İBÇK, GR ve FU tabanlı modeller gibi yalnızca YSA'nın kullanımından çok daha iyi sonuçlar vermektedir.

4. Tartışma

Türkiye'deki trafik kazalarında çekişmeli ya da ölümlü/yaralanmalı hallerdeki kusur tespit sistemi tamamen bilirkişilerin inisiyatifine bırakılmış, öznel bir yapıdadır. Bilirkişilerin öznel olarak değerlendirdikleri trafik kazalarının oluş şekli ve buna bağlı kusur oranları, taraflara

pay edilecek ceza oranlarına doğrudan etki etmektedir. Bu durumun hem maddi hem de hukuki sonuçları bulunmaktadır. Bilirkişilerin yaptığı kusur değerlendirme yöntemi, kusur oranı yüksek olan tarafı asli kusurlu; kusur oranı düşük olan tarafı iste tali kusurlu gösterip kusuru sadece tek tarafa yükleme mantığına dayanır. Örneğin, tarafların kusur oranı %75-%25 olarak belirlenmiş bir kazada bütün sorumluluğu %75 olan taraf yüklenir. Bu doğru bir yaklaşım değildir. Mahkemeler bu kusur oranlarına dayanarak hüküm vermekte, sigorta şirketleri bu oranları göz önüne alarak hasar maliyeti ödemesi yapmaktadırlar.

Yapılan bu çalışma ile ileride kusur oranı analizi yapılacak kazaların benzetimlerinin yapılmasına gerek bırakmadan, başta araçların almış oldukları deformasyonlar olmak üzere, kazaya yönelik çeşitli parametreleri değerlendirerek, basit bir arayüzle kusur oranı tahmini yapabilecek bir yazılımın algoritmik temelleri atılmıştır. Yapılan çalışmanın kapsamı genişlemeye çok müsait olduğundan (bu makalede sadece dört adet kaza senaryosu göz önüne alınmıştır) konuyla ilgili yeni çalışmaların önü açıktır. Ayrıca, önerilen kusur tespit modeli, konuyla ilgili mercilere (Trafik Şube Müdürlüğü, kaza bilirkişileri, sigorta şirketleri, trafik polisleri, hukukçular, vb.) fikir verebilecek, gerekli yasal düzenlemeler için yol gösterici olacaktır.

5. Kaynaklar

1. Karayolları Trafik Kanunu. (1983). Trafik Kazaları. Kanun no: 2918, Kısım Yedi, Madde 81-84. <http://www.kgm.gov.tr/SiteCollectionDocuments/KGMdocuments/Trafik/KanunYonetmelik/2918SayiliKanun.pdf> (Son erişim tarihi: 13 Haziran 2017).
2. Karayolları Trafik Yönetmeliği. (1997). Trafik Kazaları. Kısım Yedi, Madde 154-157. <http://www.mevzuat.gov.tr/Metin.Aspx?MevzuatKod=75.8182&sourceXmlSearch=&MevzuatIliski=0> (Son erişim tarihi: 13 Haziran 2017).
3. Küçük, A.K. (2017). Trafik Kazalarında Kusur ve Sorumluluk. Garanti Sigorta. http://www.guvencehesabi.org.tr/source/yazilar/Birlikten_Sayi4.pdf (Son erişim tarihi: 13 Haziran 2017).
4. Trafik Sigortaları Bilgi Merkezi (TRAMER). (2017). Maddi Hasarlı Kaza Senaryoları. https://www.sbm.org.tr/tr/Documents/ktt_kaza_durum_senaryolari.pdf (Son erişim tarihi: 13 Haziran 2017).

5. Sigorta Bilgi ve Gözetim Merkezi. (2017). <http://www.sbm.org.tr/tr> (Son erişim: 13 Haziran 2017).
6. Virtual Crash. (2017). vCrash 2.0. College of Industrial Engineers and Surveyors. <http://www.vcrash3.com/> (Son erişim tarihi: 13 Haziran 2017).
7. Edge-FX. (2017). <http://www.visualstatement.com/en/Home.aspx> (Son erişim tarihi: 13 Haziran 2017).
8. REC-TEC. (2017). <http://www.rec-tec.com/> (Son erişim: 13 Haziran 2017).
9. PC-Crash. (2017). <http://www.pc-crash.com/> (Son erişim: 13 Haziran 2017).
10. Cangul, E. (2010). Trafik kazalarında kusur oranı ölçümü için uzman bir sistemin geliştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi. Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 129s.
11. Schneider, W.H., Savolainen, P.T., Boxel, D.V. and Beverley, R. (2012). Examination of factors determining fault in two-vehicle motorcycle crashes, *Accid. Anal. Prev.*, **45**: 669–676.
12. Goh, K., Currie, G., Sarvi, M. and Logan, D. (2014). Factors affecting the probability of bus drivers being at-fault in bus-involved accidents, *Accid. Anal. Prev.*, **66**:20–26.
13. Zhang, G., Yau, K.K.W. and Zhang, X. (2014). Analyzing fault and severity in pedestrian–motor vehicle accidents in China, *Accid. Anal. Prev.*, **73**:141–150.
14. Islam, S., Jones, S.L. and Dye, D. (2014). Comprehensive analysis of single- and multi-vehicle large truck at-fault crashes on rural and urban roadways in Alabama, *Accid. Anal. Prev.*, **67**:147–158.
15. Yılmaz, A.C., Acı, Ç. and Aydın, K. (2015). "MFFNN and GRNN models for prediction of energy equivalent speed values of involvements in traffic accidents", *Int. J. Aut. Eng. Tech.*, **4(2)**:102-109.
16. Yılmaz, A.C., Acı, Ç. and Aydın, K. (2016). Traffic Accident Reconstruction and An Approach for Prediction of Fault Rates Using Artificial Neural Networks: A case study in Turkey", *Traffic Inj. Prev.* **17(6)**: 585-589.
17. Türkiye İstatistik Kurumu. (2017). Karayolu Trafik Kaza İstatistikleri. <http://www.tuik.gov.tr>. (Son erişim tarihi: 13 Haziran 2017).
18. Jang, J.S.R., Sun, C.T. and Mizutani, E. (1997). *Neuro- Fuzzy and Soft Computing: A Computational Approach to Learning and Machine Intelligence*, First Edition, Prentice Hall, 614s.
19. Özçalık, H.R. ve Uygur, A.F. (2003). Dinamik Sistemlerin Uyumlu Sinirsel Bulanık Ağ Yapısına Dayalı Etken Modellenmesi, *KSÜ Fen Ve Mühendislik Dergisi*. **6(1)**: 36-46.
20. Tsoukalas, L.H. and Uhrig, R.E. (1996). *Fuzzy And Neural Approaches in Engineering*. New York, Ny: John Wiley & Sons, 600s.
21. Jang, J.S.R. (1993). ANFIS: Adaptive-Network Based Fuzzy Inference Systems, *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.* **23(03)**:665-685.
22. Çakıt, E. (2008). El becerisine etki eden faktörlerin değerlendirilmesine yönelik bulanık mantık yaklaşımı. Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 130s.
23. MathWorks. (2017). MatLab Software. <http://www.mathworks.com/products/matlab>. (Son erişim tarihi: 13 Haziran 2017).
24. MathWorks. (2017). ANFIS. <https://www.mathworks.com/help/fuzzy/neuro-adaptive-learning-and-anfis.html>. (Son erişim tarihi: 13 Haziran 2017).
25. MathWorks. (2017). gbellmf <https://www.mathworks.com/help/fuzzy/gbellmf.html> (Son erişim tarihi: 13 Haziran 2017).

Taşıt Ağları için Yeni Bir Çok Kanallı Ortam Erişim Kontrol Protokolü Yaklaşımı

Fikri AĞGÜN¹, Musa ÇIBUK^{2*}, Shafqat UR REHMAN³

¹ Enformatik Bölümü, Bitlis Eren Üniversitesi, Bitlis, Türkiye

² Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Bitlis Eren Üniversitesi, Bitlis, Türkiye

³ Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Ankara, Türkiye

* mcibuk@beu.edu.tr

(Geliş/Received: 23.06.2017; Kabul/Accepted: 27.07.2017)

Özet

Bu makalede, Taşıt Ağlarında, ağın erken adaptasyon yöntemi ile hızlı organize olmasını ve yeni melez bir atama mekanizması yardımı ile çok kanallılık ve gerçek zamanlı iletme katkı sağlayacak bir Ortam Erişim Kontrol (OEK) protokolü yaklaşımı önerilmektedir. Önerilen yaklaşım ile taşıt ağlarındaki düğümlerin, trafik akışı sırasında, ileri bir noktadaki yol kenarı birimlerine iletişim isteklerinin ulaştırılması neticesinde gerekli kanal atamalarının erkenden yapılması ve böylece ağın daha erken organize olması hedeflenmektedir. Bu yaklaşımın hızlı topoloji değişimleri olan taşıt ağlarında kullanılması ile hızlı organize olma ve çok kanallı gerçek zamanlı veri iletimine önemli ölçüde katkı sağlayacağı öngörülmektedir. Önerilen yaklaşımla, iletişim kanal atamasının erken yapılması nedeniyle kanal tahsis gecikmesi en az seviyede olur. Çoklu kanal haberleşmesi için taşıt ağlarıyla uyumlu ve standardize edilmiş olan DSRC (Dedicated Short Range Communication) kullanılmıştır. Farklı hareket yönleri için farklı frekans kanallarının kullanılması nedeniyle, iletim ve erişim girişimlerine daha dayanıklı bir yaklaşım elde edilmiştir. Öneri bu bağlamda ele alındığında, yukarıda belirtilen nedenlerden dolayı, bu alanda yapılmış diğer birçok OEK protokolüne göre çok daha iyi sonuçlar vereceği aşikârdır.

Anahtar Kelimeler: Taşıt ağları, Ortam erişim kontrol protokolü, Erken adaptasyon, Hızlı organize olma, Çok kanallı iletişim.

A New Multi-Channel Media Access Control Protocol Approach for Vehicular Networks

Abstract

In this paper, a new Media Access Control (MAC) protocol approach is proposed, which will enable rapid networking by means of early adaptation of the network and multi-channel and real-time transmission with the aid of a new hybrid assignment mechanism. With the proposed approach, it is aimed that the nodes in the vehicle networks will organize early in the network by making the necessary channel assignments in advance as a result of transmitting the communication requests to the Road Side Units (RSU) at a certain point during the traffic flow. Using this approach in vehicle networks, which have fast topology changes, it is predicted that it will contribute the rapid organization of network and multichannel real-time communication. With the proposed approach, the channel allocation delay is at the lowest level due to the earlier assignment of communication channel. DSRC (Dedicated Short Range Communication), which is compatible and standardized for VANETs (Vehicular Adhoc Network), is used for multi-channel communication. Due to the use of different frequency channels for different directions of movement, a more robust approach to transmission and access interferences has been achieved. When the proposal is addressed in this context, it is clear that for the above reasons, it will yield much better results than many other MAC protocols made in this area.

Keywords: Vehicular networks, Medium access control protocol, Early adaptation, Fast reorganizing, Multichannel communication.

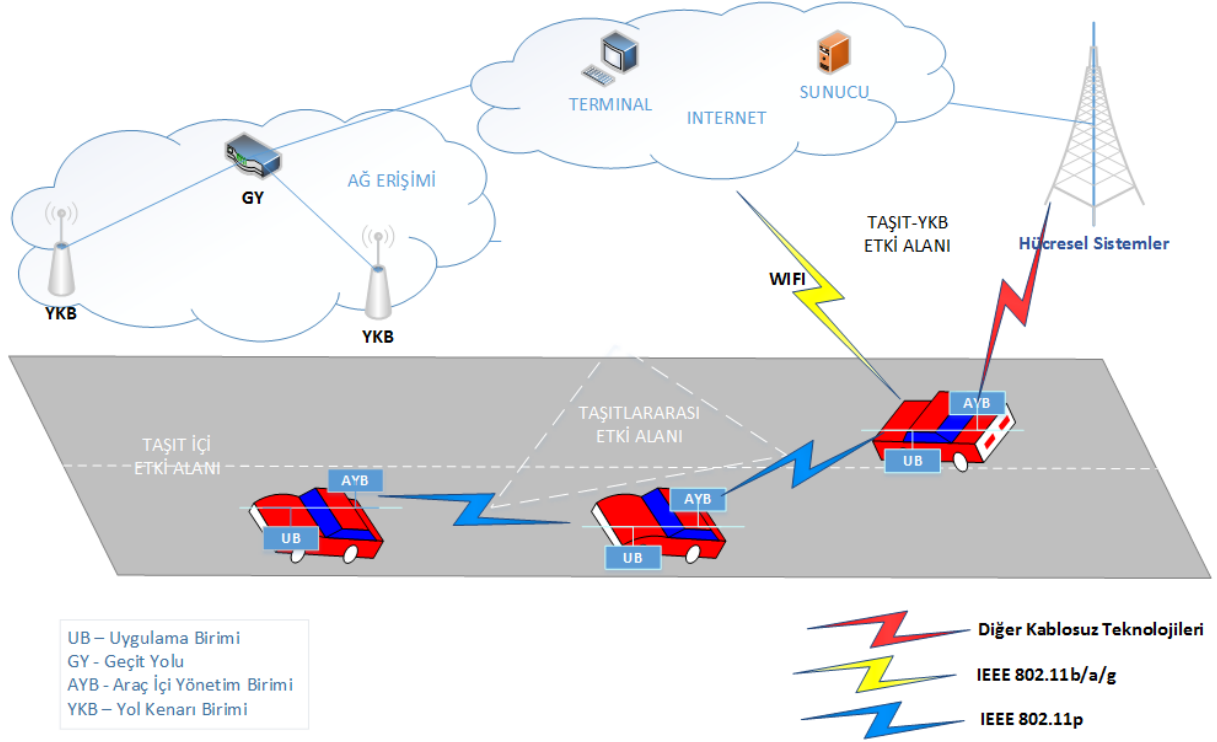
1. Giriş

Taşıt Ağları taşıtlar arası ve taşıt-yol kenarı birimleri arası iletişim için oluşturulan ağlardır[1]. Bu ağlarda kullanılan teknolojiler

kısa, orta ve uzun mesafe olmak üzere 3 (üç) alt grupta sınıflandırılmaktadır. Çoğunlukla taşıt-taşıt ve taşıt-yol kenarı birimi arası haberleşmelerde bu ağlar için özel olarak standartlaştırılan Tahsisli Kısa Mesafe

Haberleşme (Dedicated Short Range Communication–DSRC [2]), IEEE 802.11p [3] ve IEEE1609.4/Wireless Access for Vehicular Environment (WAVE[3] - Taşıtsal Ortamlar İçin Kablosuz Erişim) gibi orta mesafe haberleşme teknolojileri tercih edilmektedir. Şekil 1. 'de taşıt ağlarının taslak mimarisi gösterilmiştir.

Taşıt kullanıcılarının konfor ve güvenlik taleplerinin artması üreticilerin bu alanlarda önemli çalışmalar yapmasını tetiklemiştir. Taşıt ağları özel frekans bandı, enerji kısıtı olmaması gibi özellikleri ile diğer kablosuz haberleşme ağlarından ayrılmaktadır. Ayrıca diğer geleneksel mobil ağlardan yüksek hızda hareket, ani topoloji değişimleri gibi özellikleri ile de ayrılmaktadırlar.



Şekil 1. Taşıt ağları taslak mimarisi

Kablosuz ağların genel problemi olan gizli terminal ve etki altında kalmış uç düğüm problemleri önemli tasarım ve işletim zorluklarıdır [1]. Güvenlik, bağlantı kopuklukları, değişken ağ yoğunluğu, sık ve hızlı değişen ağ topolojisi de başka zorluklar olarak öne çıkmaktadır. Son zamanlarda araştırmacılar bu ağlardaki zorlukları yenmek ve ağı performanslı hale getirmek üzere farklı OEK şeması çalışmaları yapmışlardır [4] [5] [6][7].

OEK protokolleri bu tip ağlarda kablosuz ortamı ağdaki taşıtlar arasında adil ve etkili bir biçimde paylaşım için tasarlanmaktadır [8].

1.1. OEK protokolleri

Taşıt ağları için tasarlanan OEK protokolleri, düğümlerin paylaşılan iletişim kanallarındaki

durumunu belirler ve aktif düğümlerin ortama erişim eşgüdümünden sorumludurlar [9].

Bir OEK protokolü, ağdaki düğümlerin birbirlerinin kapsama alanı içinde iken aynı zaman diliminde veri iletmelerini sınırlar. Zira herhangi bir ön uyarı olmazsa, paket kayıplarına neden olabilecek çarpışmalar meydana gelebilir. OEK protokolleri tüm düğümler için adil, verimli, çarpışmasız ya da mümkün olduğunca en az çarpışmalı ve güvenilir olmalıdır. OEK protokollerinin taşıt ağlarında öncelikli olarak iletim çarpışmaları, gizli terminal ve etki altındaki uç düğüm gibi üç temel problemi çözmesi beklenir [10].

Ayrıca OEK protokolleri çalışma şekilleri ve kullanılan erişim yöntemlerine göre üç farklı grupta sınıflandırılmaktadırlar. Bunlar Çekişme Tabanlı Protokoller, Gecikme Kısıtlı / Çekişmesiz

Protokoller ve Melez OEK protokolleridir. Araştırmacılar bu yöntemleri kullanarak elde ettikleri protokoller ile taşıtların ağa hızlı adapte olmasını, ağ görevlerini sorunsuz yerine getirmesini, çarpışmaların ve kayıpların mümkün olduğunca azaltılmasını hedeflemektedirler.

Bir taşıt ağında, bu görevlerin eksiksiz yerine getirilmesi ilgili ağın verimli olmasına ve taşıtların sorunsuz veri iletişimi yapmasına olanak sağlayacaktır. Bu bağlamda iyi tasarlanmış ve kurgulanmış bir OEK protokolünün gerekliliği daha açık bir şekilde ortaya çıkmaktadır. Bu açıdan bakıldığında, hareketli taşıtlardan oluşan ve merkezi yönetim birimi olarak Yol Kenarı Birimlerinin (YKB) kullanıldığı bir ağda, hareket halindeki taşıta iletişim kanalı atayıp bu atama işlemini sonraki YKB'lere erken adaptasyon sağlayarak ulaştırmak ağın hızlı organize olmasına katkı sağlayacak, erken tepki verebilmesinin önünü açacaktır. Böylece, erken adaptasyon işlemi ile gerçek zamanlı haberleşmeye katkı sunulacak, ağın hızlı organize olması sağlanabilecek ve düğümlerin iletişim kanalına erişim için çekişmesinin veya zaman kaybetmesinin önüne geçilebilecektir. Bu amaçla bu çalışmamızın ilerleyen kısmında önerilecek olan yeni bir protokol ile hareket halindeki taşıtlara erken adaptasyon sağlayan bir kanal atama mekanizması içeren OEK yaklaşımı sunulacak olup, üzerinde çalışılması hedeflenmektedir.

Literatürde yer alan birçok OEK çalışmasında, ağ iletişim kalite parametrelerini geliştirmek ve yeni yaklaşımlarla başarımını artırmak hedeflenmiştir. Bu alanda protokol tasarımı olarak ortaya konulmuş birçok OEK protokolü vardır.

ADHOC MAC [11], VeSOMAC [12], CBMAC [13], CBMMAC[14], SOFT-MAC [5], DMMAC [15], ACFM [16], VeMAC [4], CFR-MAC [17], DA-CMAC [7] gibi birçok çalışma taşıt ağlarında verimliliği, hızlı organize olmayı, gecikmeyi azaltmayı, kanal doluluk oranı gibi parametreleri iyileştirmeyi hedeflemiş olup, tek kanallı ve çok kanallı birçok algoritma önermişlerdir.

Önerilmiş çekişmeli, çekişmesiz ve melez protokollerin hemen hepsi, hareketlilik durumları, coğrafik durum, trafik gibi problemlerin çözümü için farklı metotlar önermişlerdir. Ayrıca taşıt ağlarının karakteristik özelliği ve zorluğu olan

düğümünün hızlı hareketi dolayısıyla ortaya çıkan girişim, çarpışma, ağ ile iletişimin kopması gibi problemlerin her birinin ayrı ayrı çözümü için bu yöntemler ve içerdikleri değişik yaklaşımlar, bazı uygulamalarda tek başına bazılarında ise birlikte kullanılmıştır.

Literatürdeki incelenmiş protokollerde [5-14] genel yaklaşım bilinen bir veya birkaç problemi çözmeye çalışmak, sınırlı trafik senaryolarını ele almak veya birkaç uygulama türünü desteklemek olarak gözlemlenmiştir.

Ağdaki servis kalitesi gereksinimlerini iyileştirmek, gerçek zamanlı iletme katkı sağlamak, iş başarımı ve kanalın verimli kullanımını artırmak üzere bu tip ağlarda OEK tarafında çalışmalar halen sürmektedir. Bu bağlamda, sonraki bölümde sunulan yeni protokol önerimizin, bahsedilen bu parametreler üzerinde literatüre ve uygulamaya olumlu yönde katkı sağlayacağı öngörülmektedir.

2. Önerilen Yeni Çok Kanallı Melez OEK Yaklaşımı

Bu çalışmada, diğer protokollere göre daha hızlı organize olabilmek, gerçek zamanlı iletişime katkı sunmak için çok kanallılığı öne çıkararak yeni bir kanal atama mekanizması geliştirmek ve ağın erken adaptasyonunu sağlayarak erişim gecikmelerini azaltmak hedeflenmiştir.

Önerilen yaklaşımda YKB tarafından gerçekleştirilip, yönetilmekte olan kanal tahsis mekanizması şöyledir; Ağ ortamı iki yönlü hareketin gerçekleşebildiği bir otoyol, bu otoyol boyunca belli aralıklarla yerleştirilip birbirine kablolu sabit altyapı üzerinden bağlanmış ağ yönetimini sağlayan Yol Kenarı Birimleri (YKB) ve taşıtlardan oluştuğu kabul edilmiştir. Ayrıca otoyolda seyir halinde olabilecek taşıtların YKB ile veya gerektiğinde birbirleriyle kablosuz altyapı üzerinden haberleşebildiği varsayılmaktadır. Taşıtların yön bilgisini elde etmek üzere taşıtlarda GPS cihazı olduğu ve bu cihazdan alınan bilgiler doğrultusunda yön bilgisinin tespit edildiği varsayılmıştır. YKB, otoyolda farklı hızlarda ve farklı yönlerde hareket edebilen taşıtları organize ederek, taşıtlara kontrol kanalı ve iletişim kanalı tahsislerini gerçekleştirmektedir. YKB tarafından yönetilen taşıt ağlarında genel itibarı ile taşıtların hareket ettiği yön belli olup buna bağlı olarak taşıtların

ulaşacakları sonraki istasyon bilinmektedir. Bu nedenle, taşıt ilk YKB'nin kapsama alanında iken taşıta atanan zamanlama ve kanal atama bilgisinin, diğer istasyona önceden aktarılabilmesi ve bu yolla taşıtın yeni YKB'nin ağına erken adaptasyonun sağlanabilmesi ile ağına erişim zamanında önemli bir vakit kazanımı ve hızlı organize olma adına kayda değer bir iyileştirme sağlayabileceği öngörülmektedir.

Taşıt ağlarının karakteristik özelliği olan taşıtların yüksek hızlarda hareket etmesi nedeni ile farklı yönlere giden taşıtların aynı kanalları kullanmaları girişime neden olabileceğinden bu durumun önüne geçmek üzere, önerilen çalışmada çoklu kanal mekanizmasının, sağa giden taşıtlar için ayrı, sola gidenler için ayrı kanal olacak şekilde yapılandırılması öngörülmüştür.

Önerilen yaklaşımda çoklu kanal mekanizması olarak taşıt ağları için özel olarak tasarlanmış çoklu kanal standardı olan DSRC'de tanımlı 5.98 GHz bandındaki ayrılmış, her biri 10 Mhz genişliğine sahip 7 kanallı mimarinin kullanılması uygun görülmüştür.

Bu kanallardan 3 tanesi sola giden taşıtlar için 3 tanesi de sağa giden taşıtlar için iletişim kanalı olarak kullanılmak üzere ayrılmıştır. Kanalların artan trafik yoğunluğunda yetersiz kalması durumunda, kanal içinde FDMA (Frequency Division Multiple Access) şeması kullanılarak frekans bölme veya ihtiyaca göre TDMA (Time Division Multiple Access) şeması kullanılarak zaman bölmesi yapılacak olup, her

bir taşıt için ayrı bir zaman dilimi / kanal ataması gerçekleştirilecektir.

178 numaralı DSRC kanalı kontrol kanalıdır (CCH) ve YKB'ler ile düğümler arasında gidip gelen VCAPALL (Bütün Taşıtlar için Taşıt Kanal Atama Paketi), VCAPSingle (Tek Taşıt için Taşıt Kanal Atama Paketi), Vleave (Taşıt ağdan Çıktı Paketi) ve VSIP (Taşıt Durum Bilgi Paketi) gibi paketlerin iletileceği kanaldır. Bu kanal SCCH (Zamanlama Paketi Kanalı), HBCH (Kalp Atışı Kanalı), JNCH (Ağı Katılma Kanalı) ve RESERVED (Rezerve Kanal) olmak üzere 4 alt kanala bölünmüştür. Tüm YKB'ler ve düğümler bu kanalı ortak kullanacak olup sürekli bu kanalı dinleyeceklerdir. Kullanılacak kanallara ait bilgi tablo 3.1 de verilmiştir.

YKB tüm servis kanallarını (CH178 haricindeki diğer 6 DSRC kanalı) ve 4 adet 2,5 MHz'lik alt kanala sahip kontrol kanalı (CH178 - CCH) dinlemektedir. Kontrol kanalındaki alt frekans kanallarından JNCH kanalı çekişmeli kanal olup ağı katılmak isteyen düğümlerin VSIP gönderdiği kanaldır. HBCH kanalı kapsama alanı içindeki taşıtlardan iletişim kanalı ayarlanmış olan taşıtların kalp atışı sinyali göndererek hala hayattayım ve kapsama alanı içindeyim mesajlarını gönderdikleri kanaldır. SCCH kanalı YKB'lerin taşıtlara RSUEP (Yol Kenarı Birimi Olay Paketi) paketlerini ve bu paket içerisinde VCAPSingle, VCAPALL, Vleave paketlerini gönderdiği kanaldır.

Tablo 1. Önerilen protokolün kullanması öngörülen DSRC frekans kanalları tablosu

Kanal No	Kanal İsmi	Frekans (MHz)	Görevi
1	CH172	SolSRV1	5855 - 5865
2	CH174	SolSRV2	5865 - 5875
3	CH176	SolSRV3	5875 - 5885
4	CH178	SCCH	5885 - 5895
		HBCH	
		JNCH	
		RESERVED	
5	CH180	SagSRV1	5895 - 5905
6	CH182	SagSRV2	5905 - 5915
7	CH184	SagSRV3	5915 - 5925

YKB, kendi kapsama alanına girip JNCH kanalından iletişim kanalı isteği göndermiş olan

her bir taşıta, diğer taşıtlarla çakışmayacak şekilde kanal ve/veya zaman dilimi tahsisi

gerçekleştirerek bunu SCCH kanalından olay tetiklemeli olarak düğüme duyurmaktadır. Henüz taşıt kapsama alanından çıkmadan RSU taşıtın gittiği yöndeki YKB ile haberleşerek kendisine doğru gelen bir taşıtın olduğunu IRRP (YKB'ler arası Rezervasyon Paketi) ile bildirir ve o taşıta bir kanal rezerve etmesini ister.

Komşu YKB bu isteğe göre kendisine doğru gelen taşıtın kanalı uygun ise aynı kanalı kendisinde de tahsis eder, değil ise başka bir kanal ve slot tahsis ederek bunu komşusuna sabit altyapı üzerinden iletir. Cevabı alan YKB henüz kapsama alanından çıkmamış olan taşıta SCCH kanalı üzerinden VCAPSingle paketi ile duyurur. Böylece taşıt sonraki YKB'nin kapsama alanında hangi kanalları kullanacağına öğrenmiş olur.

Ayrıca YKB, kendi kapsama alanındaki taşıtlara yapmış olduğu kanal tahsislerini, VCAT (Taşıt Kanal Atama Tablosu) adı verilen bir tabloya kaydeder. Belli periyotlarla bu tablodaki bütün taşıtların bilgilerini içeren VCAPALL paketini taşıyan bir RSUEP paketi oluşturularak SCCH kanalından tüm taşıtlara gönderir. Bu paket sayesinde tüm taşıtlar kendilerini ve üzerlerinde tuttıkları VCAT tablosunu senkronize ederler.

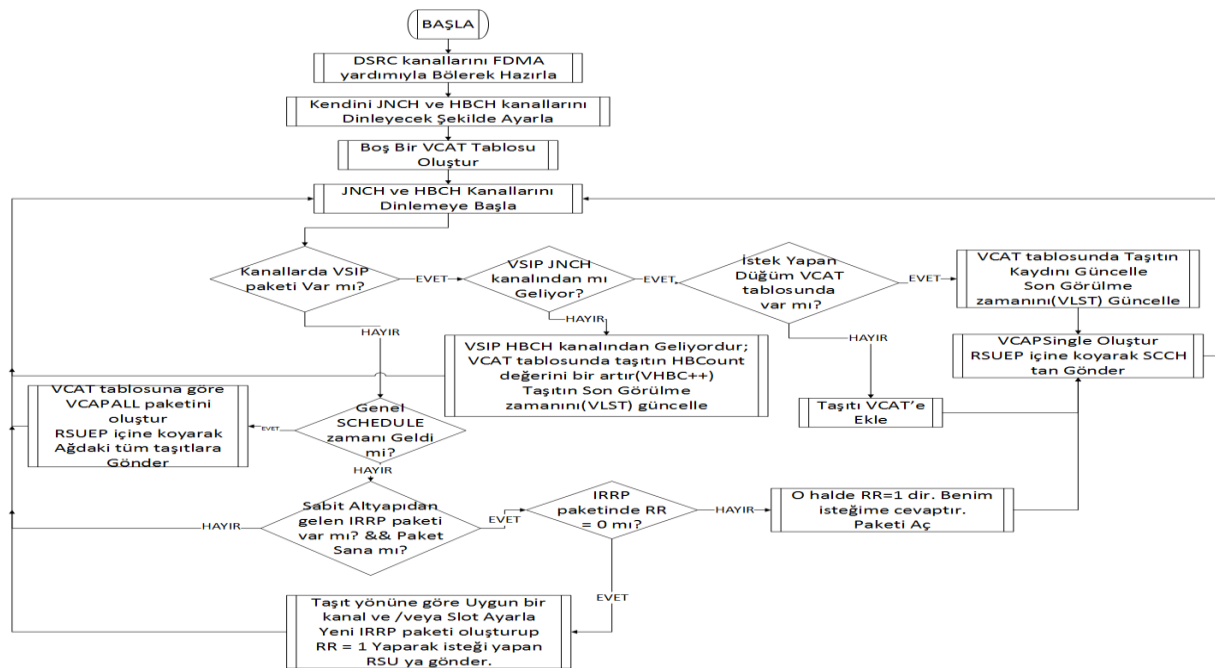
Ağda herhangi bir olay olduğu anda (yeni düğüm geldiğinde, düğüm ağdan çıktığında, düğüm ağa girdiğinde) YKB'ler olay türüne göre RSUEP oluşturarak düğümlerin alması için SCCH kanalından gönderirler.

YKB, ağdaki bir düğümün aktif olup olmadığına VSIP ile karar vermektedir. Eğer taşıtın ağda olmadığına (belli bir süre sinyal alınmadığından dolayı) kanaat getirirse, kanal yerleşim tablosundaki o düğüme ait bilgileri silmekte bu durumu Vleave paketi ile diğer düğümlere bildirmektedir. Böylece, yeni gelecek taşıtlar tarafından kanalın yeniden kullanılabilmesinin yolu açılmış olur.

Eğer daha önce ağa dâhil olmuş bir taşıt var ve taşıt belli bir süre sonra durmuş veya ağdan düşmüş ise YKB Vleave paketi ile bu durumu diğer düğümlere bildirilerek kanalı boşaltmak üzere kaydın tablodan silinmesini sağlar.

Eğer bir taşıt çeşitli nedenlerden dolayı ağdan düşmüş ise ve kanal tahsisli silinmiş ise bu durumda yeni kanal atama prosedürü çalışarak taşıta yeni kanal ataması gerçekleştirilip VCAPSingle paketi ile SCCH kanalından duyurulur.

YKB'lerin çalışmasına ait akış diyagramı Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Önerilen yaklaşıma ait YKB akış diyagramı

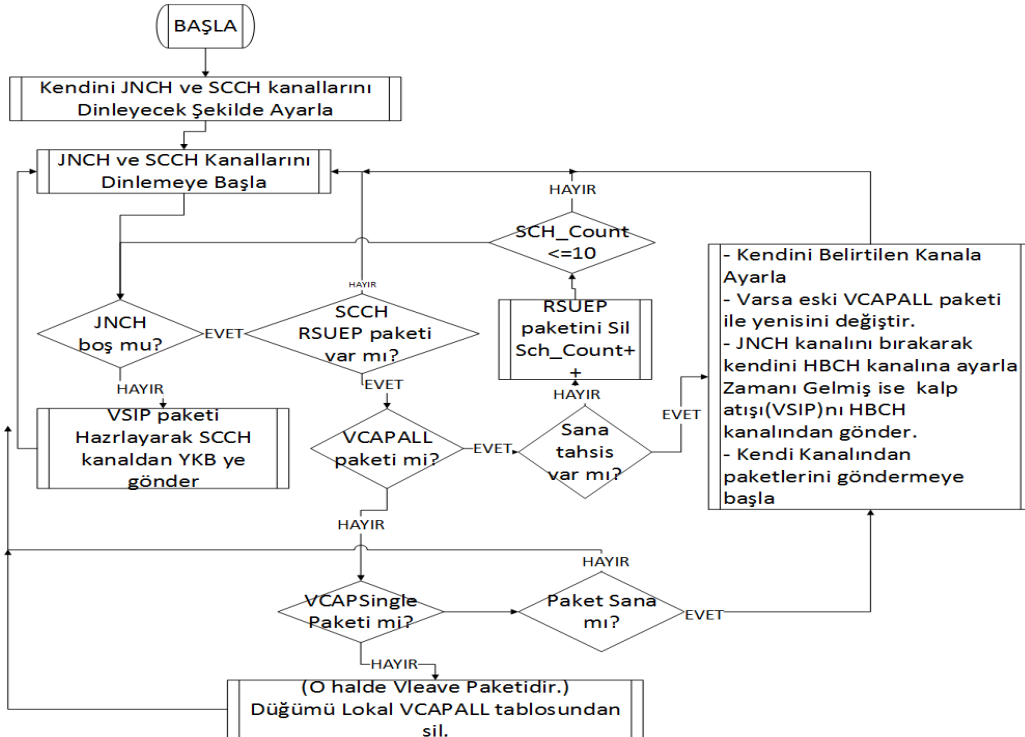
Ağda, düğüm olarak ifade edilen taşıtlar, farklı hızlarda ve iki farklı yönde hareket edebilmektedirler. Taşıtlar üzerinde konum bilgilerini paylaşabilmek ve eş zamanlamayı sağlamak üzere bir GPS (Global Positioning System) cihazı olduğu varsayılmaktadır. Her taşıt ağa dâhil olmak istediğinde, iletişim kanalı isteklerini bir Taşıt Durum Bilgi Paketi (VSIP) ile daha önceden ayarlanmış kontrol kanalının bir alt frekans kanalı olan JNCH kanalı üzerinden kapsama alanı içinde bulunduğu YKB'ye iletmektedir. İletilen paket içerisinde taşıtı ifade eden tekil bir kimlik bilgisi (VIN), taşıtın hareket yönü (VDIR) ve taşıtın aktarma düğüm istek bilgisi (RREQ) gibi bazı bilgiler bulunmaktadır.

Taşıtın ağa dâhil olmak için gönderdiği VSIP paketleri YKB tarafından alınıp işlendikten sonra kendisine kullanmak üzere bir iletişim kanalı tahsis yapılır. Bu kanal bilgisini ilgili kontrol kanalı üzerinden alan taşıt kendisini YKB'nin verdiği kanallara ayarlayarak iletişime başlar. Bu şekilde ağa katılan düğüm hayatta olduğunu YKB'ye bildirmek üzere kalp atışı sinyalleri adını verdiğimiz VSIP paketlerini normal

aralıklara düşürerek ağa katılmış düğümlerin kullandığı ve kontrol kanalını bir alt kanalı olan Kalp Atışı Kanalından (HBCH) gönderecek, ağa katılım kanalı olan çekişmeli JNCH kanalını kullanmayı bırakacaktır.

SCCH kanalını dinlemekte olan düğümler YKB'nin belli aralıklarla yayınlamış olduğu VCAPALL paketini alarak bu paketin içindeki bilgilere göre kendilerini ayarlayacaklardır. Bu paketi alan taşıt bir sonraki VCAPALL gelinceye kadar YKB'nin bildirdiği kanal atamaları ve ağ hareketlerini VCAPALL paketinde lokal olarak güncelleyecek ve bir sonraki periyodik VCAPALL paketini alıncaya kadar böyle devam edecektir. Periyodik VCAPALL gelince tablosunu silerek onun yerine bu paketteki bilgileri işleyecektir. Böylece taşıtların bağlantı bilgileri yenilenmiş olacaktır.

Eğer SCCH kanalından bir Vleave paketi gelirse bu paketi alan tüm düğümler kendi üzerlerinde tuttıkları lokal taşıt yerleşim tablosundan da bu taşıtı sileceklerdir. Düğümlerin çalışmasına ait akış diyagramı Şekil 3'de verilmiştir.



Şekil 3. Önerilen yaklaşıma ait düğüm akış diyagramı

3. Sonuç ve Değerlendirme

Önerilen yaklaşım ile düğümlerdeki yüksek hız ve hareketlilik nedeniyle ağ topolojisinin hızlı değişimine adapte olabilecek çok kanallı ve erken organize olabilen bir yaklaşımdır. Böylece ağdaki düğümler bir veya daha fazla atlama ötedeki YKB'nin kapsama alanına girmeden iletişim kanalının belirlenmesi ve kapsama alanına girdiğinde fazladan bir kanal atama gecikmesi yaşamadan hızlı topoloji değişiminden en az derecede etkilenmesi sağlanabilecektir.

Taşıt ağlarında yüksek hız nedeniyle ağda kalma süresi kısadır, bu durum geçişlerde ağ iletişiminin sık sık kopmasına sebep olabilmektedir. Yeni yaklaşım ile kopmaya sebep olan yeniden kanal edinme çekişmeleri gibi gecikmelerin önüne geçilebilecek ve böylece düğümlerin çoğunun iletişim kanalı belli olduğundan kesinti süresi yok denecek kadar azalacaktır.

Yeni yaklaşımın hızlı organize olamama problemlerine de cevap verebilecek kapasitede olduğu düşünülmektedir. Çünkü hızlı organize olmada, kanal atama mekanizmasının etkisi büyüktür. Önerilen yaklaşımda, kanal atamalarının çoğunlukla erken yapılmış olması ile hızlı organize olma noktasında önemli ilerlemeler kaydedilmesine olanak sağlanabilecektir.

Bu tip ağlardaki problemlerden bir diğeri de farklı yönere giden taşıtların ortak iletişim kanalı kullanması nedeni ile girişimlerin yaşanmasıdır ki; önerilen yaklaşım ile bu soruna çözüm olarak farklı yönere giden taşıtlara farklı kanalların atanması öngörülmektedir.

Söz konusu yaklaşımda DSRC uyumlu melez kanal atama mekanizması sayesinde gerçek zamanlı iletişime fayda sağlamak üzere her taşıta ayrı iletişim kanalı atanması hedeflenmiştir.

Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde, Taşıt ağları için OEK protokolü tasarımı alanında yapılan çalışmaların birçoğunda (SOFTMAC [5], DA-CMAC [7], ADHOCMAC [11], CBMAC[13], ACFM [16], CFRMAC [17], gibi) tek kanallı iletişim ortamı kullanıldığı görülmekte olup, bu tip çalışmalarda girişim, çarpışma, gecikme ve iş başarımı gibi parametrelerdeki sıkıntı dolayısıyla performans düşüşü yaşanmaktadır. Önerilen yaklaşım ile bu tip sorunların üstesinden gelebilecek çok kanallı iletişim ortamı sağlanması hedeflenmiştir.

Ayrıca, taşıtın yön bilgisine göre farklı kanallar kullanmak suretiyle, iletişim ve erişim girişimlerini engelleme, çoklu kanal kullanımı ve kanal içinde zaman bölmesi kullanarak çarpışmaları engelleme, önceden ağa erken adaptasyon ile ağın devamlılığının sağlanması ve erişim gecikmesinin azaltılması öngörülmektedir.

4. Kaynaklar

1. Hartenstein, H. and Laberteaux, K.P. (2008). A tutorial survey on vehicular ad hoc networks. *IEEE Commun. Mag.*, **46**: 164–171.
2. Kenney, J. B. (2011). Dedicated short-range communications (DSRC) standards in the United States, *Proc. IEEE*, **99**:1162–1182.
3. LAN/MAN Standards Committee. (2010). IEEE Std 802.11p-2010 IEEE Standart for Information Technology.
4. Omar, H. A., Zhuang, W. and Li, L. (2013). VeMAC: A TDMA-based MAC protocol for reliable broadcast in VANETs. *IEEE Trans. Mob. Comput.*, **12**: 1724–1736.
5. Abdalla, G.M., Abu-Rgheff, M.A. and Senouci. S.-M. (2009). Space-Orthogonal Frequency-Time medium access control (SOFT MAC) for VANET. *2009 Global Information Infrastructure Symposium*, 1–8.
6. Li, C., Wang, P., Chen, H.-H. and Guizani, M. (2008). A Cluster Based On-demand Multi-Channel MAC Protocol for Wireless Multimedia Sensor Networks. *IEEE Int. Conf. Commun.*, 2371–2376.
7. Sidhik, A., Mammu, K., Hernandez-jayo, U. and Sainz, N. (2015) Direction Aware Cluster-Based Multi Channel MAC Protocol For Vehicular Ad Hoc Networks. *Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob)*, 549–556.
8. Hadded, M., Muhlethaler, P., Laouiti, A., Zagrouba, R. and Saidane, L.A. (2015). TDMA-Based MAC Protocols for Vehicular Ad Hoc Networks: A Survey, Qualitative Analysis, and Open Research Issues. *IEEE Commun. Surv. TUTORIALS*, **17**: 2461–2492.
9. Gillani, S. A., Shah, P.A., Qayyum, A. and Hasbullah, H.B. (2014). MAC Layer Challenges and Proposed Protocols for Vehicular Ad-hoc Networks. *Vehicular Ad-hoc Networks for Smart Cities*, **306**: 3–13.
10. Shukla, N., Katiyar, P., Devgan, N., Kumar, N. and Dinker, A.G. (2014). Comparison of the MAC Protocols in Vehicular Ad-Hoc Network. *Int. J. Adv. Res. Electr. Electron. Instrum. Eng.*, **3**: 9543–9548.
11. Borgonovo, F., Capone, A., Cesana, M. and Fratta, L. (2003). ADHOC: A new, flexible and reliable MAC architecture for ad-hoc networks. *IEEE Wirel. Commun. Netw. Conf. WCNC*, **2**: 965–970.

12. Yu, F. and Biswas, S. (2007). A Self Reorganizing MAC Protocol for Inter-vehicle Data Transfer Applications in Vehicular Ad Hoc Networks. *10th International Conference on Information Technology (ICIT 2007)*, 110–115.
13. Günter, Y., Wiegel, B. and Großmann, H. P. (2007). Cluster-based medium access scheme for VANETs. *IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Proceedings, ITSC*, 343–348.
14. Su, H. and Zhang, X. (2007). Clustering-Based Multichannel MAC Protocols for QoS Provisionings Over Vehicular Networks. *IEEE Trans. Veh. Technol.*, **56**: 3309–3323.
15. Lu, N., Ji, Y., Liu, F. and Wang, X. (2010). A dedicated multi-channel MAC protocol design for VANET with adaptive broadcasting. *IEEE Wirel. Commun. Netw. Conf. WCNC*, **2008**.
16. Guo, W., Huang, L., Chen, L., Xu, H. and Xie, J. (2012). An Adaptive Collision-Free MAC protocol based on TDMA for Inter-Vehicular communication. *Wireless Communications Signal Processing (WCSP), 2012 International Conference*, 1–6.
17. Zou, R., Liu, Z., Zhang, L. and Kamil, M. (2014). A Near Collision Free Reservation based MAC Protocol for VANETs. *IEEE WCNC*, **2**: 1538–1543.

Elazığ İli Merkez İlçesi Hal Köyü'nde Korunan ve Otlatılan Alanların Botanik Kompozisyon Bakımından Karşılaştırılması

Halil KARAN^{1*}, Mehmet BAŞBAĞ²

¹Fırat Üniversitesi, Sivrice Meslek Yüksek Okulu, Bitkisel ve Hayvansal Üretim Bölümü
23119, Elazığ, TÜRKİYE

²Dicle Üniversitesi Ziraat Fakültesi Tarla Bitkileri Bölümü, 21280, Diyarbakır
hkaran@firat.edu.tr

(Geliş/Received:21.07.2017;Kabul/Received:13.09.2017)

Özet

Bu araştırma; 2014-2015 yıllarında, Elazığ Merkezine bağlı Hal Köyü merasında korunan ve otlatılan iki farklı alanın karşılaştırılması amacıyla yürütülmüştür. İki yıllık araştırma sonucuna göre bitki ile kaplı alan; korunan alanda %61.95, otlatılan alanda ise %65.45 olarak elde edilmiştir. Kaplama alanına göre botanik kompozisyonunda; korunan alanda buğdaygillerin oranı %46.67, baklagillerin oranı %28.54 ve diğer familyalardan bitkilerin oranı %24.80, otlatılan alanda ise buğdaygillerin oranı %56.41, baklagillerin oranı %24.58 ve diğer familyalardan bitkilerinin oranı %19.02 olarak tespit edilmiştir. Ağırlığa göre botanik kompozisyonunda buğdaygillerin, baklagillerin ve diğer familyalardan bitkilerin oranları sırasıyla korunan alanda %49.90, %37.11, %13.01, otlatılan alanda ise %47.79, %25.84, %26.37 olarak saptanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Korunan, Otlatılan, Mera, Botanik Kompozisyon

Comparison with Regard to Grazed and Non-Grazed Areas Botanical Composition in Hal Village of Elazig Province

Abstract

This study was carried out in order to compare the two different areas non-grazed and grazed in the Hal village pasture, Elazig center in 2014-2015. According to results of two years of research, plant-covered area was obtained 61.95% in the non-grazed area and 65.45% in the grazed area. In botanical composition according to covering area, it was identified as, in non-grazed areas, 46.67% the proportion of gramineae, 28.54% the proportion of legumes and 24.80% the percentage of plants from other families. while, in the grazed area, proportion of gramineae was 56.41%, proportion of legumes was 24.58% and the proportion of plants from other families was 19.02%. According to dry weight, ratios of the gramineae, leguminous and the other family plants in the the botanical composition were respectively 49.90%, 37.11%, 13.01% for non-grazed pastures and 47.79% 25.84%, 26.37% in the grazed area.

Keywords: Non-Grazed, Grazed, Pastures, Botanical Composition,

1.Giriş

Ekonomik bir hayvansal üretim, yeterli miktarda kaliteli yem üretilmesiyle ve üretiminde en düşük girdi maliyetlerinin uygulanması ile mümkündür. Bugün hayvansal üretimde maliyetlerin %70'ini tek başına yem girdisi oluşturmaktadır [1]. Hayvansal üretimde en önemli girdi maliyetini oluşturan kaba yemler, hayvansal üretimde vazgeçilmez ve temini kolay olan bu yem kaynaklarının en başında çayır ve mera alanları gelmektedir [2]. Ancak, ülkemiz çayır mera alanları, yıllarca yapılan zamansız ve aşırı otlatmalar sonucunda verim ve kalitelerini önemli ölçüde kaybetmiş ve özellikle ülkemiz eğimli mera alanları uzun yıllar erozyona maruz

kalmış, günümüzde hala etkisi devam etmektedir. Bu nedenle, hayvancılık işletmelerinin kaliteli kaba yem gereksinimlerini karşılayabilmeleri için; çayır-meraların ıslah edilmesi, yem bitkisi üretim alanlarının artırılması, ucuz ve alternatif diğer kaba yem kaynaklarının hayvansal üretime kazandırılması ve kaliteli kaba yem üretim tekniklerinin üreticilere aktarılması [3] ve meralarda bulunan mevcut bitkilerin de zarar görmeden en iyi bir şekilde hayvanların yararlanmasına olanak tanyan, İl Mera Komisyonu tarafından belirlenen otlatma mevsimine de uyulması gerekmektedir. Ayrıca, düzensiz ve aşırı otlatılmanın sonucunda lezzetli olan ve hayvanlar tarafından tercih edilen bitkiler aşırı

derecede azalmakta, buna karşılık istilacı ve çoğalcı türler otlatılan alanı kaplamaktadır [4], ayrıca kurak ve yarı kurak bölgelerde meraların tek başına dinlendirilmesi ile yeterince iyileşmenin olamayacağı [5] dikkate alınmalı ve gerekli önlemler zamanında alınmalıdır.

Yem bitkileri, hayvansal üretimin en önemli girdilerinden birini oluşturan yemi sağlamasının yanı sıra, toprakların fiziksel ve kimyasal özelliklerine, kendisinden sonra ekilen kültür bitkilerinin verim ve kalitesine olumlu etkileri bulunmaktadır [1]. Ülkemizde bulunan çayır-meralar; hayvanların ihtiyaç duydukları kaba yemin % 30.12'si karşılanmakta [6] ve yaklaşık olarak %34.8'i Doğu Anadolu Bölgesinde bulunmaktadır [7] Elazığ il sınırları içerisinde ise 225.000 ha çayır-mera alanı bulunmakta ve toplam tarım alanının %17'sini oluşturmaktadır [8]. Hayvancılık açısından çok önemli olan meralarımızın botanik kompozisyonlarının yanında mera durum ve kalitesinin bilinmesi ve zaman içerisinde meydana gelebilecek değişimlerin önceden bilinmesi son derece önemlidir. Bu nedenle bu çalışma, Elazığ ili Merkez ilçesi Hal Köyü'nde bulunan doğal meranın korunan ve otlatılan alanların botanik kompozisyonlarının belirlenerek, meraların ıslahında temel oluşturacak bilgiler elde edilmeye çalışılmıştır.

2. Materyal ve Metot

Bu araştırma; 2014-2015 yıllarında Elazığ ili merkez ilçesi Hal Köyü merasında Mayıs ayı içerisinde yürütülmüştür. Yaklaşık 1200 rakımda bulunan araştırma alanı, merkeze 35 km mesafede, küçükbaş hayvanlar tarafından otlatılan bir meradır. Çalışma alanı %5-25 arasında değişen bir eğime sahiptir.

Meteoroloji Müdürlüğünden temin edilen verilere bakıldığında; Elazığ ilinin uzun yıllar sıcaklık ortalaması 13.1 °C olduğu görülmektedir. Uzun yıllar ortalamasına bakıldığında, en sıcak ayların Temmuz (27.3 °C), Ağustos (26.9 °C), en soğuk ayların ise Ocak (-0.9°C) ve Şubat (0.5 °C) ayları olduğu görülmektedir.

Elazığ ilinin uzun yıllar yağış toplamı 408.7 mm'dir. En fazla yağışın düştüğü Nisan ayında 65.5 mm, en az yağışın düştüğü Ağustos ayında ise 0.6 mm olduğu görülmektedir. Araştırmanın

yürütüldüğü ilk yıl toplam yağış 445.9 mm olurken, ikinci yıl 499.7 mm olmuştur.

Araştırma alanının toprak analizleri Tarım İl Müdürlüğüne yaptırılmıştır. Korunan ve otlatılan alanların her ikisinin toprakları hafif tuzlu, kuvvetli alkali, fosfor seviyesi az, potasyum seviyeleri yeterli olduğu, kireç içerikleri bakımından korunan alanın orta, otlatılan alanın çok fazla, organik madde içeriği bakımından korunan alanın orta, otlatılan alanın ise yüksek seviyede olduğu görülmüştür. Araştırma, korunan ve otlatılan alanlarda "nokta yöntemi" ne göre yapılmıştır. Mera kesiminde ölçüm yapmak için (50 metrelik) şerit metre kullanılmış, nokta çerçeve aleti şerit metrenin her 5 metresinde bir yerleştirilerek, her hat için 10 adet durak belirlenerek tespitler yapılmıştır. Bu şekilde her 50 metrelik hatta 10 adet durakta ve her durakta da 10 adet gözlem tekrar edilmiştir. Toplamda 2000 gözlem yapılmıştır. Bu yöntem; 9-10-11-12-13-14-15] tarafından kullanılmıştır.

Bitki ile kaplı alan oranları, nokta yönteminde her hat 100 gözlemden oluşmaktadır, bir bitki grubunun oranı yapılan 100 gözlemin o hattaki (%) olarak ifadesidir. Vejetasyon ölçümü yapıldığı esnada her hatta karşılaşılan bitki türleri; buğdaygiller, baklagiller ve diğer familya bitkileri olmak üzere üç gruba ayrılmıştır. Her hatta bir bitki grubu için saptanan kaplama oranı değerlerini, o hattın toplam bitki ile kaplı alanına oranlayarak, söz konusu bitki grubunun botanik kompozisyonundaki değeri (bitki ile kaplı alandaki oranı) yüzde (%) olarak elde edilmiştir.

Bir bitki grubu için 10 hatta (20 kuadratta) saptanan bitkilerin ağırlığa göre botanik kompozisyon ortalaması, buğdaygiller, baklagiller ve diğer familya bitkileri için her parselde, ortalama ağırlığa göre botanik kompozisyon değeri olarak hesaplanmıştır.

Denemelerden elde edilen veriler, bitki ile kaplı alan, kaplama alanına göre botanik kompozisyon (bitki ile kaplı alan ve botanik kompozisyon verilerine varyans analizi uygulamadan önce açı transformasyonu uygulanmıştır) ve ağırlığa göre botanik kompozisyon değerleri tesadüf blokları desenine göre MSTATC (Michigan State University, East Lansing, MI) istatistik paket programında değerlendirilmiş ve önemli çıkan faktör ortalamaları LSD testi ile guplandırılmıştır.

3.Bulgular ve Tartışma

3.1.Bitki ile kaplı alan

Bitki ile kaplı alan, buğdaygiller, baklagiller ve diğer familya bitkileri ile kaplı alanların iki yıllık ortalamalarında yılların interaksyonunda istatistiksel açıdan farklılıklar bulunmuştur. Ayrıca, iki yılın birleşik analiz sonuçlarına göre; buğdaygiller ile kaplı korunan-otlatılan, diğer familya bitkileri ile kaplı yıl x korunan-otlatılan alanlarda ve diğer familya bitkileri ile kaplı alanda çalışmanın ikinci yılında korunan-otlatılan alanlarda istatistiksel olarak farklılıklar çıkmıştır. Bitki ile kaplı alan açısından en yüksek değer çalışmanın ikinci yılında %82.40 olarak elde edilirken, en düşük değeri ise çalışmanın birinci yılından %45.00 olarak tespit edilmiştir.

Bitki ile kaplı alanda buğdaygillerin oranında yıllar ve korunan-otlatılan alanda istatistiksel açıdan farklılıklar bulunmuştur. İstatistiksel açıdan en yüksek değeri çalışmanın ikinci yılında %35.75 olarak elde edilirken, en düşük değeri ise çalışmanın birinci yılında %27.95 olarak elde edilmiştir. İki yıllık ortalama sonuçlara göre bitki ile kaplı alanda buğdaygillerin oranı en yüksek otlatılan alanda %35.75 olarak elde edilirken, en düşük korunan alanda %27.95 olarak elde edilmiştir. Bitki ile kaplı alanda baklagillerin oranına bakıldığında, yıllar arasında istatistiksel olarak farklılıklar bulunmuştur. İstatistiksel açıdan en yüksek değeri çalışmanın ikinci yılında %29.25 olarak elde edilirken, en düşük değeri ise çalışmanın birinci yılında %7.35 olarak bulunmuştur.

Bitki ile kaplı alan değerleri ile ilgili korunan ve otlatılan alanda elde edilen bulgular ile yapılan benzer çalışmalarda elde edilen bulgular sırasıyla %61.95-%65.45, %37.47 ve %18.48 [16] %52.63 ve %38.14 [17], %68.00 ve %53.35 [18], %79.63 ve %45.00 [11], %68.82 ve %88.80 [19], %86.47 ve %70.81 [20], %47.20, %38.20 [21] ve %96.33 ve %77.83 [15] olarak tespit edilmiştir.

Bitki ile kaplı alanda; buğdaygillerle kaplı alana ait korunan ve otlatılan alanda elde edilen bulgular ile yapılan benzer çalışmalarda elde edilen bulgular sırasıyla %27.95-%35.75, %24.17 ve %11.40 [16] %23.25 ve %10.97 [17], %36.75 ve %15.38 [11], %43.40 ve %82.03

[19], %35.17 ve %38.49 [20], %40.66 ve %23.50 [15] ve sadece korunan alanda %40.45 [10] olarak tespit edilmiştir. Baklagillerle kaplı alana ait korunan ve otlatılan alanda elde edilen bulgular ile yapılan benzer çalışmalarda elde edilen bulgular sırasıyla %18.60-%18.00, %7.58 ve %2.32 [17], %32.34 ve %19.16 [20], %1.90 ve %3.01 [16] %20.75 ve %4.88 [11], %2.75 ve %1.63 [19], %34.83 ve %21.16 [15] ve sadece korunan alanda %21.69 [10] olarak tespit edilmiştir. Diğer familya bitkileriyle kaplı alana ait korunan ve otlatılan alanda elde edilen bulgular ile yapılan benzer çalışmalarda elde edilen bulgular sırasıyla %15.40-%11.70, %21.80 ve %24.85 [17], %18.17 ve %13.17 [20], %5.91 ve %4.08 [16] %22.13 ve %24.63 [11], %22.67 ve %5.14 [19], %20.83 ve %33.16 [15] ve sadece korunan alanda %23.09 [10] olarak tespit edilmiştir. Korunan ve otlatılan meralarda saptanan toplam bitki, buğdaygil, baklagil ve diğer familya bitkileri ile kaplı alan oranları ve ortalamaları Tablo 1'de verilmiştir.

Bu çalışmada korunan-otlatılan alanlardan elde edilen veriler benzer çalışmalarda elde edilen verilerden genel olarak yüksek veya düşük çıkmıştır. Bu farklılığa, ekolojik ve topoğrafik faktörlerin yanında, ölçüm metodlarının farklılığı, merada otlayan hayvan türü ve küçükbaş hayvanların yem tercihlerinden kaynaklanmış olabilir.

3.2.Kaplama alanına göre botanik kompozisyon (%)

Bitki ile kaplı alanda botanik kompozisyon değerlerine Tablo 1'e bakıldığında, bitki ile kaplı alanda; buğdaygiller ve baklagillerin oranında yıllar arasında istatistiksel olarak farklılıklar çıkarken, diğer familya bitkilerinde ise çalışmanın ikinci yılında korunan-otlatılan alanda istatistiksel anlamda farklılıklar çıkmıştır. Diğer familya bitkilerinde bu farklılık, en yüksek korunan alanda %26.19, en düşük ise otlatılan alanda %16.14 olarak elde edilmiştir. Bitki ile kaplı alanda en yüksek buğdaygillerin oranı çalışmanın birinci yılında %59.78, en düşük buğdaygillerin oranı ise çalışmanın ikinci yılında %43.30 olarak elde edilmiştir. Bitki ile kaplı alanda en yüksek baklagillerin oranı çalışmanın ikinci yılında %35.54, en düşük baklagillerin oranı ise çalışmanın birinci yılında %17.57

olarak elde edilmiştir. Korunan ve otlatılan alanda; botanik kompozisyonunda bitki ile kaplı alanda buğdaygillerin oranıyla ilgili elde edilen bulgular ile yapılan benzer çalışmalarda elde edilen bulgular sırasıyla %46.67-56.41, %44.18 ve %28.76 [17], %68.63 ve %41.67 [18], %40.65 ve %54.37 [20], %77.30 ve %61.53 [16] %44.41 ve %34.21 [11], %63.09 ve %92.39 [19], %53.40 ve %45.00 [21], %42.35 ve %29.77 [15] olarak elde edilmiştir. Botanik kompozisyonunda bitki ile kaplı alanda baklagillerin oranıyla ilgili elde edilen bulgular ile yapılan benzer çalışmalarda elde edilen bulgular sırasıyla %28.54-24.58, %14.40 ve %6.08 [17], %11.96 ve %6.83 [18], %37.38 ve %27.08 [20], %5.15 ve %15.91 [16] %26.88 ve %10.82 [11], %4.00 ve %1.83 [19], %13.40 ve %21.00 [21], %35.93 ve %27.08 [15] olarak elde edilmiştir. Botanik kompozisyonunda bitki ile kaplı alanda diğer familya bitkilerinin oranıyla ilgili elde edilen bulgular ile yapılan benzer çalışmalarda elde edilen bulgular ise sırasıyla %24.80-%19.02, %41.42 ve %65.16 [17], %19.41 ve %51.51 [18], %21.98 ve %18.57 [20], %17.60 ve %22.51 [16], %28.71 ve %54.97 [11], %32.93 ve %5.78 [19], %33.30 ve

%34.10 [21], %21.71 ve %43.14 [15] olarak elde edilmiştir.

Botanik kompozisyonundaki buğdaygil, baklagil ve diğer familya bitkilerinin oranlarını kıyasladığımızda; genel olarak yapılan benzer çalışmalardan yüksek veya düşük çıkmıştır. Çalışmada, botanik kompozisyonunda bitki ile kaplı alanda buğdaygillerin oranının otlatılan alanda daha yüksek çıktığı ve [19], Gül ve [20]'ın yapmış oldukları çalışma ile benzerlik gösterdiği, bu duruma, merada otlayan hayvanların baklagilleri daha fazla tercih etmelerinden dolayı buğdaygillerin oranının otlatılan alanda daha yüksek çıktığı düşünülmektedir. Önceki çalışmaların genelinde korunan alandaki diğer familya bitkilerinin oranı otlatılan alandaki diğer familya bitkileri oranından yüksek olduğu görülmektedir. Bu duruma, küçükbaş hayvanların bitki yem tercihi fazlalığı [22] yanında geniş yapraklı diğer familya bitkilerini de tercih etmelerinden dolayı korunan alanda diğer familya bitkilerinin oranı otlatılan alandan fazla çıktığı düşünülmektedir. Çalışmada elde edilen verilerin, [19] ve [20]'ın elde ettikleri verilerle de benzerlik gösterdiği görülmektedir.

Tablo 1. Korunan otlatılan meralarda bitki ile kaplı alan oranı (%) ve bitki ile kaplı alanda botanik kompozisyon oranı (%)

İncelenen Özellikler	2014			2015			2014-2015 Korunan A..	2014-2015 Otlatılan A.
	Kor	Ot.	Ort.	Kor	Ot	Ort.	Ort.	Ort.
Bitki ile kaplı alan	41.40	48.60	45.00B**	82.50	82.30	82.40A	61.95	65.45
Buğdaygiller	24.00	31.90	27.95B*	31.90	39.60	35.75A	27.95B*	35.75A
Baklagiller	8.20	6.50	7.35B **	29.00	29.50	29.25A	18.60	18.00
Diğer Familya Bit.	9.20B*	10.20B	9.70B**	21.60a*A	13.20bB	17.40A	15.40	11.70
Taşlık Alan	14.10	10.90	12.50	8.70	4.80	6.75		
Ölü Bitki Kalıntısı	27.60	16.50	22.05	1.10	1.30	1.20		
Boş Alan	16.90	23.60	20.25	7.70	11.60	9.65		
Küçükbaş Gübresi	-	0.40	0.20	-	-	-		
Botanik Kompozisyon								
Buğdaygiller	54.92	64.63	59.78A**	38.41	48.18	43.30B	46.67	56.41
Baklagiller	21.67	13.47	17.57B**	35.40	35.68	35.54A	28.54	24.58
Diğer Familya Bit.	23.41	21.90	22.66	26.19 a*	16.14 b	21.17	24.80	19.02

* %5 düzeyinde önemli, ** %1 düzeyinde önemli

Büyük harfle gösterilenler 2014-2015 birleşik yılı ifade etmektedir.

3.3.Ağırlığa göre botanik kompozisyon (%)

Korunan ve otlatılan meraların ağırlığa göre botanik kompozisyonunda buğdaygil, baklagil ve

diğer familya bitkilerinin oranı açısından Tablo 2 incelendiğinde; çalışmanın yapıldığı birinci ve ikinci yılda istatistiksel anlamda farkın bulunmadığı, fakat iki yıllık birleşik analiz

sonuçlarına göre buğdaygil ve baklagil ortalamalarında yıllar arasında, diğer familya bitkilerinde ise korunan-otlatılan alan ortalamalarında istatistiksel olarak önemli farklılıklar olduğu tespit edilmiştir.

Ağırlığa göre botanik kompozisyonunda; en yüksek buğdaygil oranı %62.20 ile 2014 yılında, en düşük buğdaygil oranı ise %35.49 ile 2015 yılında elde edilmiştir. En yüksek baklagil oranı %42.48 ile 2015 yılında, en düşük baklagil oranı ise %20.47 ile 2014 yılında elde edilmiştir. Diğer familya bitkilerinde ise yıllar arasında önemli farklılık bulunmazken, korunan-otlatılan alanda farklılıklar bulunmuştur. Diğer familya bitkileri; en yüksek otlatılan alanda %26.37, en düşük korunan alanda %13.01 olarak elde edilmiştir.

Korunan ve otlatılan alanda ağırlığa göre botanik kompozisyonunda; buğdaygillerin oranıyla ilgili elde edilen bulgular ile yapılan benzer çalışmalarda elde edilen bulgular sırasıyla; %49.90-%47.79, %90.42 ve %31.81 [18], %20.59 ve %10.31 [17], %38.33 ve %26.53 [23], %89.82 ve %54.86 [16] olarak elde edilmiş, baklagillerin oranıyla ilgili elde edilen bulgular ile yapılan benzer çalışmalarda elde edilen bulgular sırasıyla; %37.11-%25.84, %1.35

ve %7.26 [18], %6.99 ve %2.29 [17], %31.94 ve %23.65 [23], %8.14 ve %19.56 [16] olarak elde edilmiş, diğer familya bitkileri oranıyla ilgili elde edilen bulgular ile yapılan benzer çalışmalarda elde edilen bulgular sırasıyla; %13.01-%26.37, %8.23 ve %60.93 [18], %72.32 ve %87.03 [17], %29.73 ve %49.80 [23] %1.94 ve %25.58 [16] olarak elde edilmiştir.

Benzer çalışmalarda elde edilen verilerle bu çalışmada elde edilen veriler düşük veya yüksek çıkmıştır. Bu duruma; korunan alanda ekolojik ve topoğrafik faktörlerle birlikte uygulanan ölçüm metotlarının farklılığı, otlatılan alanda ise bu faktörlerle birlikte otlatma baskısının farklılığından kaynaklanmış olabileceği düşünülmektedir. Yapılan bu ve benzer çalışmalarda botanik kompozisyonunda diğer familya bitkilerinin oranının otlatılan alandaki oranı korunan alandaki oranına göre daha yüksek çıktığı görülmüştür. Bu duruma; merada otlatılan hayvanların diğer familya bitkilerine oranla buğdaygil ve baklagilleri daha fazla tercih etmesinden dolayı otlatılan alandaki diğer familya bitkilerinin oranında fazlalığa neden olmuş olabileceği tahmin edilmektedir.

Tablo 2. Korunan otlatılan meralarda bitki ile kaplı alan oranı (%) ve bitki ile kaplı alanda botanik kompozisyon oranı (%)

İncelenen Özellikler	2014			2015			2014-2015 Korunan A.	2014-2015 Otlatılan A.
	Kor	Ot.	Ort	Kor	Ot	Ort	Ort	Ort.
Buğdaygillerin oranı	68.24	56.16	62.20A**	31.56	39.41	35.49B	49.90	47.79
Baklagillerin oranı	23.94	16.99	20.47B**	50.27	34.69	42.48A	37.11	25.84
Diğer Familya Bit. Oranı	7.85	26.85	17.35	18.17	25.90	22.04	13.01B*	26.37A

* %5 düzeyinde önemli, ** %1 düzeyinde önemli

Büyük harfle gösterilenler 2014-2015 birleşik yılı ifade etmektedir.

4.Sonuçlar ve Öneriler

Meralarımızın botanik kompozisyonları mutlaka bilinmelidir. Meralarımızın kontrolsüz otlatmaları sonucu verim ve kalite düzeyleri düşmüş olduğundan dolayı, meralarımızdan yeterince ve istenilen düzeyde yararlanılmamaktadır. Kurak ve yarı kurak bölgelerde meraların tek başına dinlendirilmesi ile yeterince iyileşmenin olamayacağı, otlatma mevsimine uyulmadığı takdirde meranın botanik kompozisyonu olumsuz yönde değişeceği ve istilacı türlerin hakim olacağı bilinmektedir. Bu

ve benzer alanlarda yapılacak ıslah çalışmalarının yanında, yapılacak gübreleme ve özellikle otlatma mevsimine uyulması meraların botanik kompozisyonuna ve dolayısıyla hayvanlarımızın meralardan daha fazla yararlanmasına katkı sağlayacaktır.

5. Kaynaklar

1. Sağlamtimur, T., Tansı, V. ve Baytekin, H. (1998). Yem Bitkileri Yetiştirme. Çukurova Üniversitesi Ziraat Fakültesi Ders Kitabı, No: C-74. 3. Adana, 238s.

2. Aydın, İ., Uzun, F. (2002) Çayır-mera amenajmanı ve ıslahı. Ondokuz Mayıs Üniversitesi Ziraat Fakültesi Ders Kitabı, No: 9, Samsun.
3. Serin, Y. ve M. Tan. (2001) Yem Bitkileri Kültürüne Giriş. Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları, No: 206.
4. Şengönül, K., Kara, Ö., Palta, Ş. ve Şensoy, H. (2009). Bartın Uluyayla yöresindeki mera vejetasyonunun bazı kantitatif özelliklerinin saptanması ve ekolojik yapının belirlenmesi. *Bartın Orman Fakültesi Dergisi*, **11(16)**: 81-94
5. Bakır, Ö. ve E. Açıkgöz. (1976). Yurdumuzda yem bitkileri çayır ve mera tarımının bugünkü durumu, geliştirme olanakları ve bu konuda yapılan araştırmalar. Çayır-Mera ve Zootečni Araştırma Enstitüsü Yay. No. 61. Ankara.
6. Gökkuş, A. (1994). Türkiye'nin kaba yem üretiminde çayır-mera ve yem bitkilerinin yeri ve önemi. Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, 25, 250-261. Erzurum.
7. Altın, M., Gökkuş, A. ve Koç, A. (2011). Çayır ve mera yönetimi (1.cilt). Tarım Köyişleri Bakanlığı TÜGEM. 376 s. Ankara, 2011.
8. Anonim, (2016) Tarım İl Müdürlüğü Verileri, ELAZIĞ
9. Kendir, H. (1995) Bazı mera vejetasyon ölçme metotlarında optimum örnek sayısının saptanması. Doktora Tezi, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,
10. Başbağ, M., İ. Gül ve V. Saruhan. (1997). Diyarbakır'da korunan bir mera alanında bitki tür ve kompozisyonları ile ot verimlerinin incelenmesi üzerine bir araştırma. Türkiye 2. Tarla Bitkileri Kongresi, Samsun, 499-503.
11. Dirihan, S. (2000). Diyarbakır Pirinçlik Garnizonunda korunan ve otlatılan meralarda bitki tür ve kompozisyonları ile ot verimlerinin incelenmesi üzerine bir araştırma. Yüksek Lisans Tezi, Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,
12. Türk, M., Bayram, G., Budaklı, E. ve Çelik, N. (2003). Sekonder mera vejetasyonunun farklı ölçüm metotlarının karşılaştırılması ve mera durumunun belirlenmesi. Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, **17(1)**:65-77
13. Altın, M., Tuna, C. ve Gür, M. (2010). Tekirdağ taban ve kıraç meralarının verim ve botanik kompozisyonuna gübrelemenin etkisi. *Tekirdağ Ziraat Fakültesi Dergisi*, **7 (2)**: 191-198
14. Aydın, A., Çağan, E. ve Başbağ, M. (2014). Mardin ili Derik ilçesinde yer alan bir meranın ot verimi ve kalitesinin belirlenmesi. *Turkish Journal of Agricultural and Natural Sciences*, **1**:1625-1630
15. Çağan, E., Aydın, A. ve Başbağ, M. (2014) Korunan ve Otlatılan İki Farklı Doğal Alanın Botanik Kompozisyon Açısından Karşılaştırılması *Turkish Journal of Agricultural and Natural Sciences*, **1**:1734-1741
16. Efe, A. (1988). Çukurovada yakılan ve otlatılan bir mera ile korunmuş bir meranın bitki örtüsü ve verim güçlerinin saptanması üzerine bir araştırma. Yüksek Lisans Tezi. Ç.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü,
17. Polat, T. (1994) Değişik ıslah yöntemlerinin Şanlıurfa ile Tektek Dağları doğal meralarının verim potansiyellerine etkisi üzerinde bir araştırma. Doktora tezi, Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,
18. Özer, A. (1988). Osmaniye ilçesi, Kesmeburun Köyünde korunan bir mera ile otlatılan meraların bitki örtüsü ve verim güçlerinin saptanması üzerine bir araştırma. Yüksek Lisans Tezi, Ç.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü,
19. Başbağ, M. ve Çelik, M. A. (2001) Diyarbakır İli Gözalan Köyünde korunan ve otlatılan meralardaki bitki tür ve kompozisyonları ile ot verimlerinin incelenmesi üzerine bir araştırma. Türkiye 4. Tarla Bitkileri Kongresi, Cilt III, Tekirdağ, 187-192.
20. Gül, İ. ve Başbağ, M. (2005). Karacadağ'da Otlatılan ve Korunan Meralarda Bitki Tür ve Kompozisyonlarının Karşılaştırılması. *H.Ü.Z.F. Dergisi*, **9 (1)**:9-13,
21. Çomaklı, B., Öner, T. ve Daşcı, M. (2012). Farklı kullanım geçmişine sahip mera alanlarında bitki örtüsünün değişimi. Araştırma Makalesi / Research Article *Iğdır Üni. Fen Bilimleri Enst. Der. / Iğdır Univ. J. Inst. Sci. & Tech.* **2(2)**: 75-82.
22. Altın, M., Gökkuş, A. ve Koç, A. (2011). Çayır ve mera yönetimi (2. cilt). Tarım ve Köyişleri Bakanlığı, Tarımsal Üretim ve Geliştirme Genel Müdürlüğü. Ankara. 314 s.
23. Çağan, E., Aydın, A. ve Başbağ, M. (2014). Korunan ve otlatılan iki farklı doğal alanın verim ve kalite açısından karşılaştırılması. *Turkish Journal of Agricultural and Natural Sciences Special Issue*: **1**:919-926

Dicle Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından desteklenen “Elazığ İli Merkez İlçeye Bağlı Hal Köyü’nde Korunan ve Otlatılan Meraların Bitki Tür ve Kompozisyonları ile Ot Verim ve Kaliteleri Bakımından Karşılaştırılması” isimli doktora tezinin özetidir.

Buck-Boost Dönüştürücü Tasarımı, Modellenmesi ve Kontrolü

Abuzer ÇALIŞKAN, Sencer ÜNAL, Ahmet ORHAN

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi
Fırat Üniversitesi
acaliskan@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 24.05.2017; Kabul/Accepted: 03.07.2017)

Özet

Bu makalede, da-da Buck-Boost dönüştürücü tasarımı, modellenmesi ve kontrolü incelenmiştir. Bu amaçla Buck-Boost konverterin dinamik eşitlikleri ele alınarak Matlab/simulink modeli gerçekleştirilmiştir. Farklı referans çıkış gerilim değerlerine bağlı olarak dönüştürücünün cevapları detaylı olarak incelenmiştir. Bu farklı durumlara bağlı simülasyon sonuçları sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: da-da Buck-boost dönüştürücü, Matlab/Simulink modelleme

Buck-Boost Converter Design, Modeling and Control

Abstract

In this article, Buck-Boost converter design, modeling, and control have been examined. For this purpose, the Matlab / simulink model has been realized by considering the dynamic equations of the Buck-Boost converter. Depending on the different reference output voltages, the converter's responses have been examined in detail. Simulation results based on these different situations are presented.

Keywords: dc-dc Buck-boost converter, Matlab/Simulink modeling

1. Giriş

Anahtarlama gücü kaynakları günümüzde özellikle elektrikli araçlar, yenilenebilir enerji sistemleri, bilgisayar, televizyon, cep telefonu ve birçok elektrikli ev aletlerinde oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Anahtarlama gücü kaynaklarının diğer klasik güç kaynaklarına göre avantajı oldukça hafif, daha küçük ve dolayısıyla daha az yer kaplamalarıdır.

Da-da dönüştürücüler bir doğrultucu, batarya ya da güneş pilinin çıkışındaki regülesiz da gerilimi regüleli da gerileme dönüştürülmesinde kullanılan yapılardır [1].

Buck-boost dönüştürücü genel olarak izoleli ve izolesiz olarak iki farklı yapıda olabilir. Ancak izolesiz yapı daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Buck-boost dönüştürücünün çıkış gerilim değeri görev periyodunun değerine bağlı olarak giriş gerilim değerinden daha büyük ya da daha küçük olabilir. Bunun yanında çıkış geriliminin polaritesi giriş geriliminin polaritesinin tersidir.

Da-da dönüştürücüler yük ve giriş gerilimi değişse bile çıkışta sabit da çıkış gerilimi sağlamalıdır[2]. Doğrusal olmayan ve zamanla değişen yapılarından dolayı bu dönüştürücülerin kontrolü zordur [3].

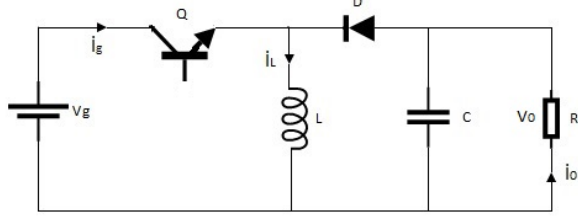
Buck-boost dönüştürücü iki farklı modda çalışabilir. Eğer indüktans akımı I_L sıfıra düşmüyorsa dönüştürücü sürekli iletim modunda çalışmaktadır. Aksi takdirde, sürekli olmayan çalışma modunda çalışmaktadır [4].

Buck-boost dönüştürücülerin verimi yüksektir. Çıkışa kısa devre koruması yerleştirmek kolaydır. Ancak giriş akımı kesiklidir ve Q anahtarından yüksek tepe akımları akar [5].

Tek yarı iletken anahtardan oluşan buck-boost dönüştürücü devresi kullanmak devreyi daha basit ve kompakt yapar. Aynı zamanda görev periyodu ayarlanarak istenen çıkış gerilimi elde edilebilir [6].

2. Buck-Boost Dönüştürücü

Buck-boost dönüştürücüye ait devre şeması Şekil 1’de gösterilmiştir.



Şekil 1. Buck-boost dönüştürücü devresi

Buck-boost devresini analiz etmek için Q anahtarının iletimde olduğu (Q_{on}) ve Q anahtarının kesimde olduğu (Q_{off}) iki durumu göz önüne almak gerekir.

Anahtarın görev periyodu d ise;

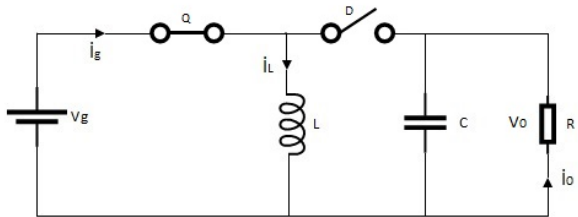
$$d = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} = \frac{t_{on}}{T_s} \quad (1)$$

Burada t_{on} ve t_{off} sırasıyla anahtarın iletimde ve kesimde kalma süreleridir. T_s ise anahtarlama periyodudur.

İdeal koşullarda konverterin çıkış gerilimi;

$$V_o = \frac{d}{1-d} * V_g$$

olarak değişir. Burada d görev periyodu 0-1 aralığında değişir. Farklı d değerleri için farklı çıkış gerilim değerleri elde edilebilir. Çıkış gerilimi; $d < 0.5$ ise buck (düşürücü), $d > 0.5$ olursa boost (yükseltici) olur. Buck-Boost dönüştürücünün çıkışı biraz fazla dalgalı olduğundan akım da kesintilidir [7].



Şekil 2. Buck-boost dönüştürücü devresinde Q anahtarın iletimde olma durumu

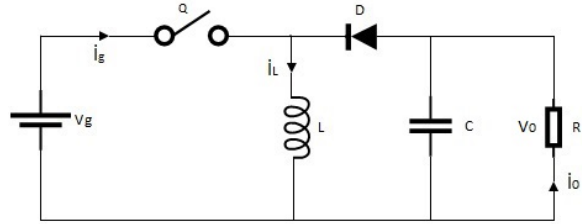
Anahtar iletimde iken (Q_{on}) Şekil 2’deki durum oluşacaktır. Bu durumda Q anahtarı iletimdedir, D diyodu ise ters gerilime maruz kaldığı için kesimdedir. Giriş kaynak akımı Q anahtarı ve indüktans üzerinden artarak akar.

Bu durumda;

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_g}{L} \quad (2)$$

$$\frac{dV_C}{dt} = -\frac{V_o}{RC} \quad (3)$$

Anahtar kesimde iken (Q_{off}) Şekil 3’deki durum oluşacaktır. Bu durumda Q anahtarı kesimdedir. İndüktanstan akan akım C, D ve yük üzerinden akar. İndüktansta depolanan enerji bu şekilde yüke aktarılmış olur.



Şekil 3. Buck-boost dönüştürücü devresinde Q anahtarın kesimde olma durumu

Bu durumda;

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_C}{L} \quad (4)$$

$$\frac{dV_C}{dt} = -\frac{I_L}{C} - \frac{V_C}{RC} \quad (5)$$

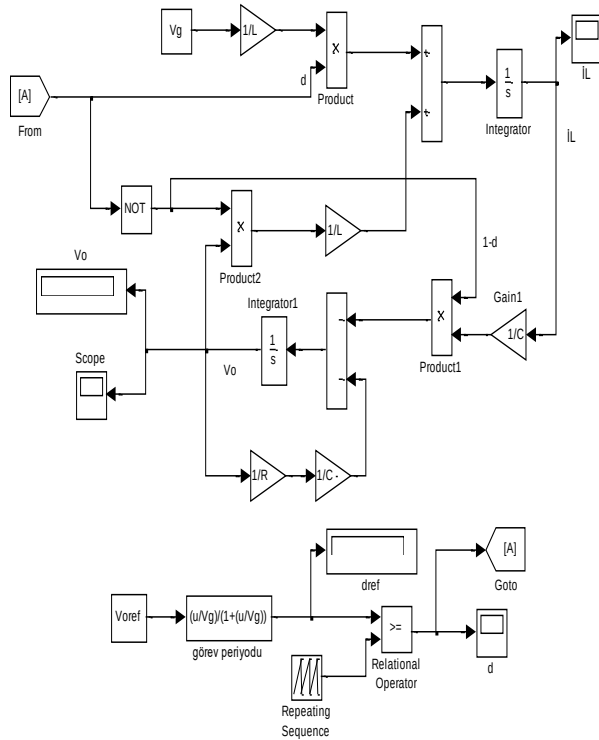
Denklem (2-5) arasındaki eşitlikler görev periyodu göz önüne alınarak birleştirilirse aşağıdaki eşitlikler elde edilebilir.

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_g}{L} \cdot d + \frac{V_C}{L} \cdot (1-d) \quad (6)$$

$$\frac{dV_C}{dt} = -(1-d) \cdot \frac{I_L}{C} - \frac{V_C}{RC} \quad (7)$$

3. Buck-Boost Dönüştürücünün Matlab/Simulink Modeli

Denklem 6 ve 7'deki eşitlikler Matlab/Simulink programı kullanılarak Şekil 4'teki gibi modellenmiştir.



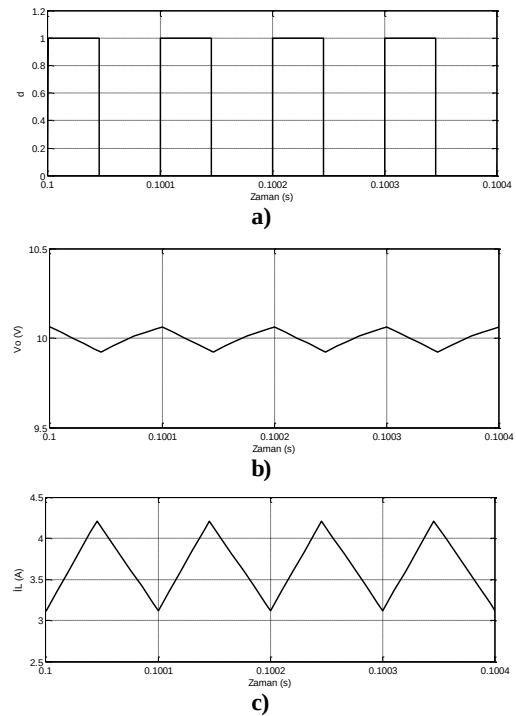
Şekil 4. Buck-boost dönüştürücünün Matlab/Simulink Modeli

Şekil 4'de istenen çıkış gerilimi Voref değeri olarak modele girilirse, bu çıkışı sağlayacak görev periyodu hesaplanır ve modele giriş olarak uygulanır.

Şekil 4'deki model $V_g=12$ V, $C=650$ μ F, $L=500$ μ H, $R=5$ ohm ve anahtarlama frekansı $f_s=10$ kHz alınarak farklı referans çıkış gerilim (V_{ref}) değerleri için çalıştırılmış ve aşağıdaki sonuçlar alınmıştır. Oluşturulan model girilen referans gerilime göre dönüştürücünün görev periyodunun değerini hesaplamaktadır.

İstenen referans çıkış gerilim $V_{ref}=10$ V olarak girildiğinde buck-boost dönüştürücünün görev periyodu, çıkış gerilimi ve indüktans akımı Şekil 5'de görüldüğü gibi olmaktadır. Bu

durumda görev periyodunu model $d=0.454$ olarak hesaplamıştır.

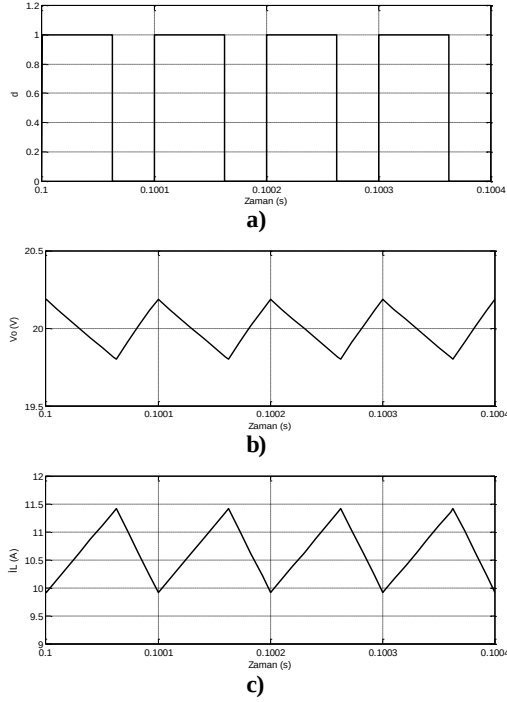


Şekil 5. Buck-boost dönüştürücüde $V_{ref}=10$ V için

- Görev periyodunun zamana göre değişimi
- Çıkış gerilimin zamana göre değişimi
- İndüktans akımının değişimi

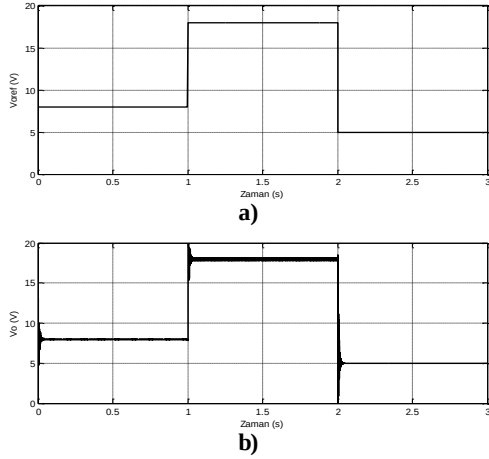
İstenen referans çıkış gerilim $V_{ref}=20$ V olarak girildiğinde buck-boost dönüştürücünün görev periyodu, çıkış gerilimi ve indüktans akımı Şekil 6'da görüldüğü gibi olmaktadır. Bu durumda görev periyodunu model $d=0.625$ olarak hesaplamıştır.

Buck-boost dönüştürücüye giriş bilgisi olarak zamanla değişen bir gerilim bilgisi girildiğinde, girilen referans gerilime karşılık anlık görev periyodunu hesaplayarak referans gerilime uygun çıkış gerilimini üretmektedir. Vore^f'in ilk 1 s boyunca 8 V olması, 1-2 s aralığında 18 V ve 2-3 s aralığında ise tekrar 5 V'a düşmesi istendiğinde, buck-boost dönüştürücünün referans geriliminin ve çıkış geriliminin değişimi Şekil 7'de görülmektedir.



Şekil 6. Buck-boost dönüştürücüde $V_{ref}=20$ V için

- a) Görev periyodunun zamana göre değişimi
- b) Çıkış geriliminin zamana göre değişimi
- c) İndüktans akımının değişimi



Şekil 7. Buck-boost dönüştürücüde farklı V_{ref} için

- a) Referans geriliminin zamana göre değişimi
- b) Çıkış geriliminin zamana göre değişimi

6. Sonuçlar

Bu çalışmada da-da Buck-Boost dönüştürücü tasarımı, modellenmesi ve kontrolü incelenmiştir. Farklı referans gerilimlere göre istenen çıkış gerilimini sağlayan kontrollü da-da Buck-Boost dönüştürücünün Matlab/Simulink modeli gerçekleştirilmiş ve bu duruma ilişkin sonuçlar detaylı olarak sunulmuştur.

7. Kaynaklar

1. D. Abhinav and Kanchan Pal. "Design of Buck-Boost Converter for Constant Voltage Applications and Its Transient Response Due To Parametric Variation of PI Controller.", International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology 3.6 , 2014.
2. H. Güldemir, "Modeling and Sliding Mode Control of Dc-Dc Buck-Boost Converter", 6. International Advanced Technologies Symposium (IATS'11), 475-480, 16-18 May 2011, Elazığ, Turkey.
3. S. Buso, "Design of Robust Voltage Controller for a Buck-Boost Converter Using μ -Synthesis", IEEE Transactions on Control Systems Technology. 7(2): 222–229, 1999.
4. M. J. P. Garcia, G. Gutierrez, J. E. Normey-Rico, C. de Prada, "Integrated Design & Control of a Buck Boost Converter", Revista Controle & Automação, 20(3):, 2009.
5. M. H. Rashid, "Power Electronics Devices, Circuits and Applications", Pearson Education, 2014.
6. S. Subhajit, T. Tanya, D. Vijayakumar, "Design and simulation of speed controller using ac-dc buck boost converter for dc motor drive with soft starter", 978-1-4673-6150-7/13/\$31.00, 2013 IEEE
7. J. Chen, and Y. J. Bao. "Characteristics analysis and comparison of buck boost circuit and Cuk circuit." Power Electronics Systems and Applications (PESA), 2013 5th International Conference on. IEEE, 2013.

FIR Filtre Tasarımı ve FPGA Ortamında Gerçeklenmesi

Erman ÖZPOLAT, Barış KARAKAYA, Arif GÜLTEN

Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 23119 ELAZIĞ
bkarakaya@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 12.06.2017; Kabul/Accepted: 24.07.2017)

Özet

Bu çalışmada, bir alçak geçiren FIR filtrenin MATLAB ortamında tasarımı yapılmış ve tasarım FPGA (Alanda Programlanabilir Kapı Dizileri) ortamında gerçekleştirilmektedir. Tasarlanan filtre, çalışmanın ilk uygulamasında Verilog donanım tanımlama dili kullanılarak FPGA’da programlanmıştır. İkinci uygulamada ise aynı filtre tasarımı, MATLAB Simulink ile uyumlu çalışan XSG (Xilinx Sistem Üretici) platformunda gerçekleştirilmiştir. Her iki tasarım için de giriş olarak EEG sinyali uygulanmış ve filtre çıkışlarındaki sinyaller incelenmiştir. Uygulama sonuçları, FPGA’da kapladığı alan ve kaynak kullanımı bakımından karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: FPGA, MATLAB Simulink, Sayısal Filtreler, XSG.

Design and Implementation of FIR Filter on FPGA Platform

Abstract

In this study, design of a lowpass FIR filter is executed on MATLAB platform and the design is implemented on Field Programmable Gate Array (FPGA) platform. The designed filter was programmed on FPGA using Verilog HDL in the first application of study. In the second application, the same filter design was implemented on XSG (Xilinx System Generator) platform which runs compatibly with MATLAB Simulink. For both of the two applications, the EEG (Electroencephalography) signal was applied as input and output signals of filters are examined. Results of applications were compared with each other by means of footprint and resource utilizations on FPGA.

Keywords: FPGA, MATLAB Simulink, Digital Filters, XSG.

1. Giriş

Sayısal sinyal işleme teknikleri iletişim ve multimedya gibi birçok uygulamada yaygın olarak kullanılmaktadır. Filtreler sayısal sinyal işlemede önemli bir kullanım alanına sahiptir. Çoğu elektronik cihazlarda sayısal filtreler kullanılmaktadır. Bu yüzden sayısal filtreler, benzetimlerle gerçekleştirilmelerinin yanı sıra donanımsal olarak da gerçekleştirilebilirler. Son yıllarda, gerçek zamanlı ve yüksek başarımlı gerektiren işaret işleme uygulamalarının gerçekleştirilmesinde FPGA (Alan Programlanabilir Kapı Dizileri) kullanımının arttığı görülmektedir. Başlangıçta sadece sayısal tasarımların kontrol edilmesi için geliştirilen FPGA çipleri, teknolojiye yeni gelişmelere paralel olarak, yüksek dereceli paralel çalışabilme kabiliyetine sahip olmuştur [1,2]. FPGA ile gerçekleştirilen tasarımların güç tüketimlerinin düşük ve çalışma hızlarının oldukça yüksek olduğu bilinmektedir.

Ayrıca FPGA ile aritmetik işlemler kolayca gerçekleştirilmektedir [3]. Literatürde sayısal filtre tasarımı FPGA kullanılmasıyla ilgili birçok çalışma vardır. Yapılan bir araştırmada, bant geçiren filtre işlemini gerçekleştiren yeniden programlanabilir filtre bankası yazılımı geliştirilmiş ve tekrardan programlanabilir donanım olarak FPGA kullanılmıştır [4]. Cardarilli ve arkadaşlarının çalışmasında [5], çok oranlı filtre bankalarının FPGA ile tasarlanmasında üç çeşit algoritmanın kapsamlı karşılaştırması yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre çok evreli yarım-bant filtre bankasının yüksek verimli olduğuna karar verilmiştir. Lee ve arkadaşlarının çalışmalarında [6], çeşitli basamak-seri DSP fonksiyonlarının FPGA ile gerçekleştirilmesinde, işlem gecikmeleri ve FPGA üzerinde kapladıkları alanlar üzerinde inceleme yapılmıştır. Gerçek zamanlı DSP fonksiyonları için FPGA’ların daha iyi performans gösterdiği görülmüştür. Anurag ve

arkadaşlarının yaptığı çalışmada [7], XSG kullanılarak yüksek geçiren bir filtre gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda FPGA'nın paralel işlem kapasitesi sayesinde, sayısal filtre gerçeklemesindeki hızının büyük ölçüde arttığı gözlemlenmiştir. Başka bir çalışmada ise Emmanuel ve arkadaşları [8], XSG kullanarak yüksek geçiren, alçak geçiren ve bant durduran üç çeşit FIR filtreyi ayrı ayrı tasarlamış ve daha sonra hepsini aynı XSG düzleminde tasarlayarak FPGA'nın işlem kapasitesine bakılmıştır. Hepsinin aynı anda uygulanmasında bile FPGA'nın çok iyi performans gösterdiği gözlemlenmiştir.

Bu çalışmada da alçak geçiren FIR filtre, hem FPGA Verilog dili kullanarak hem de FPGA ile uyumlu çalışan XSG platformu kullanılarak tasarlanmış ve kaynak kullanımları bakımından karşılaştırılmıştır.

Bu giriş ile birlikte, ikinci bölümde materyal ve metot yer almaktadır. Bu bölümde analog ve sayısal filtreler hakkında kısa bir bilgi verildikten sonra FIR filtre yapısı ve çalışması anlatılmaktadır. Ayrıca, FPGA ve XSG platformları tanıtılırken FPGA ve XSG ortamında yapılan tasarımlar ve bu tasarımlara ait sonuçlara yer verilmektedir. Üçüncü bölümde ise elde edilen sonuçlar değerlendirilmekte ve kaynaklar bölümü ile çalışma sonlandırılmaktadır.

2. Materyal ve Metot

2.1. Filtreler

Filtreler günümüzde telefon, telgraf, radyo, radar, uydu ve haberleşme sistemleri, işaret işleme uygulamaları gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Filtreler genellikle elektronik devrelerde, gürültüyü ve istenmeyen işaretleri süzmek, belirli frekansları birbirinden ayırmak, örnekleme işleminden önce sinyalleri sınırlamak gibi çeşitli amaçlarla kullanılmaktadırlar [9].

Elektronik sistemlerde çok önemli elemanlar olan filtreler özellikle radyo, televizyon, ses, resim ve veri haberleşmesinde kullanılan vazgeçilemez devrelerdir. Ses, hi-fi sistemleri ve elektronik müzik uygulamalarında önemli işlevleri vardır. Ayrıca sismoloji, jeofizik, tıbbi elektronik, beyin dalgaları ve uzaktan ölçüm gibi birçok bilimsel araştırma konusunda da çok

önemli işlevleri mevcuttur. Bunun yanı sıra filtreler genellikle doğru bileşenlerin süzülmesinde, gürültü azaltmada, rezonanstan kaçınmada veya rezonans oluşturmada, işaret biçimlendirmede, işaret zayıflatmada ve güç faktörü düzeltmede kullanılırlar [9].

Yapısal olarak filtreler analog ve sayısal veya aktif ve pasif olarak sınıflandırılırlar. Direnç, indüktans ve kapasitans elemanlarının kullanıldığı filtreler Pasif Filtre, transistör ve/veya op-amplamlar da kullanıldığı filtreler ise Aktif Filtre olarak adlandırılmaktadır. En genel anlamda 2 kapılı bir filtre devresinin gösterimi Şekil 1'de verilmektedir.

Şekil 1'de gösterilen genel filtre yapısında $H(s)$, filtrenin transfer fonksiyonu olarak adlandırılır ve giriş – çıkış işaretleri arasındaki ilişkiyi ifade eder. Transfer fonksiyonu, giriş ve çıkış işaretlerine göre isimlendirilir.



Şekil 1. Temel filtre devresi görünümü.

2.1.1. FIR filtre

Fiziksel bir olay hakkında veri taşıyan ve o olay hakkında bize bilgiler veren, bir veya daha fazla sayıda değişken içeren fonksiyonlara işaret denir. İstenilen özelliklere sahip işaret üreten veya girişine uygulanan işarete göre çıkışında istenilen özelliklere sahip çıkış üreten yapılara ise sistem denir. İşaret işleme ise bilgisayar ya da özel olarak üretilmiş olan sayısal işaret işleme donanımları sayesinde, sistemleri meydana getiren yapıdır. İşaret işleme genel olarak tanımlanacak olursa, bir işaret dizisinin çeşitli işlemler yapıldıktan sonra istenilen hale getirilmesi işlemidir [10].

Sayısal işaret işlemenin amacı, bir işaretin frekans spektrumu üzerinde belirli frekanslarda istenilen işlemleri yapması ve bu işlemlerden sonra istenilen özellikte sonuç alınmasını sağlamaktır. Yapılan bu sayısal işaret işleme yapısına sayısal filtre adı verilmektedir. Sayısal filtreler yazılım veya donanımla gerçekleştirilebilirler. Sayısal filtreler darbe

cevaplarına göre ikiye ayrılmaktadırlar. Bunlar FIR (sonlu darbe cevaplı) ve IIR (sonsuz darbe cevaplı) filtrelerdir [11].

Rasyonel bir sistem fonksiyonu ile doğrusal ötelemeyle değişmez bir sistem için $x(n)$ girişi ve $y(n)$ çıkışı doğrusal sabit katsayılı fark denklemiyle ilişkilendirilir. Örneğin $h(n) = a^n$. $u(n)$ birim örnek cevabına sahip olan bir sistemin çıkışına ilişkin ifade Denklem 1'deki gibi tanımlanır.

$$y(n) = \sum_{k=0}^{\infty} a^k \cdot x(n - k) \quad (1)$$

Bu denklem herhangi bir $x(n)$ girişi için $y(n)$ çıkışının hesaplanmasına izin vermesine rağmen, bu gösterim hesaplama açısından çok etkin değildir. Bazı durumlarda girişin mevcut ve geçmiş değerlerine ek olarak çıkışın da geçmiş değerler cinsinden ifade edilmesi mümkün olabilir. Örneğin önceki sistemin birinci dereceden ifadesi Denklem 2'deki gibi tanımlanabilir.

$$y(n) = a \cdot y(n - 1) \quad (2)$$

FIR filtre yapısı birim geciktirme elemanı, çarpıcı ve toplayıcı olmak üzere üç temel elemandan oluşmaktadır. Birim geciktirme elemanlarının sayısı darbe cevabının sonlu süresini tanımlamaktadır. $n-1$ olarak gösterilmiş olan birim geciktirme elemanların sayısı filtrenin derecesini belirlemektedir. Çarpıcı elemanlar ise bağlı oldukları giriş işaretini ilgili filtre katsayısı ile çarpırlar. Yani, k . geciktiricinin çıkışını temsil eden $x(n-k)$ girişine karşılık çarpıcının çıkışı üretilenektir. Toplayıcılar ise, çarpıcı çıkışlarını birbiri ile toplayarak filtreye ait toplam çıkışı üretecektir. Yukarıda verilmiş olan FIR filtrenin giriş çıkış ilişkisi Denklem 3'deki gibi verilebilir;

$$y(n) = \sum_{k=0}^{N-1} b_k x(n - k) \quad (3)$$

burada $x(n)$ giriş işaretini, $y(n)$ ise filtre çıkışını temsil etmektedir.

2.2. FPGA (Alanda Programlanabilir Kapı Dizileri)

FPGA, sayısal mantığın sistemlerde uygulanmasına yönelik bir alternatiftir. FPGA'lar

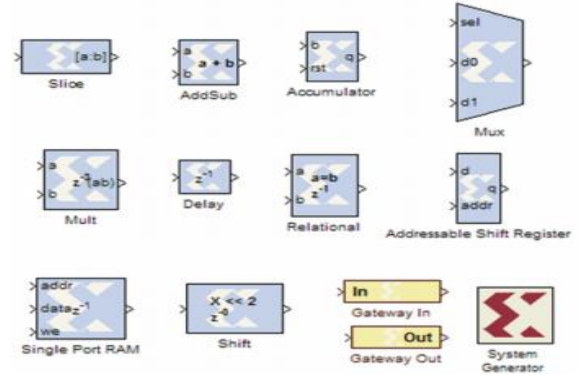
herhangi bir sayısal tasarımı uygulamak üzere elektriksel olarak programlanabilen silikon çiplerdir. İlk statik bellek tabanlı FPGA (genellikle SRAM-tabanlı FPGA olarak adlandırılır), 1967 yılında Wahlstrom tarafından tasarlanmıştır. Bu mimari, bir konfigürasyon bitleri dizisi kullanarak mantık ve ara bağlantı konfigürasyonuna olanak tanımıştır. Daha sonra modern çağımızın ilk ticari FPGA'sı, 1984 yılında Xilinx tarafından sunulmuştur. Bu FPGA, düşük sayıda bir klasik Konfigüre Edilebilir Mantık Blokları (CLB'ler) dizisi ile girişler/çıkışlar içermektedir. 64 CLB ve 58 giriş/çıkış içeren ilk FPGA'dan bu yana FPGA'lar karmaşıklık açısından son derece gelişmiştir. Günümüzün modern FPGA'ları, yaklaşık 330.000 mantık bloğu ile 1100 giriş ve çıkış içerebilmektedir. FPGA'nın temel mimarisi, üç ana bileşenden meydana gelmektedir. Bunlar; mantık fonksiyonlarını yerine getiren programlanabilir mantık blokları, bu fonksiyonları yerine getirmek üzere programlanabilir yönlendirme blokları (ara bağlantı kurma) ve çip-dışı bağlantıları yapmak üzere giriş/çıkış bloklarıdır.

VHDL, Verilog, SystemC ve Handel-C gibi donanım tanımlama dilleri sıklıkla FPGA programlaması için kullanılmaktadır. VHDL ve Verilog endüstri standardı haline gelmiştir. Çok sayıda sağlayıcısı olan Donanım Tanımlama Dilleri (HDL), benzetim ve sentez araçları sunmaktadır. Tanımlama davranışı ile RTL ve yapısal seviyeleri bu dillerde alternatifli olarak kullanılabilmektedir. SystemC, sistem seviyesi davranışını modellemek için kullanılan C++ tabanlı bir kitaplıktır. Taban dili C++ olduğundan yazılım süreçleri daha klasik bir HDL.2'dekine kıyasla daha kolay modellenmektedir. SystemC'ye yönelik sentez araçları ortaya çıkmakta olup VHDL ya da Verilog sentez ürünlerinin olgunluğuna yaklaşmamıştır. Handel-C de VHDL ya da Verilog'a nazaran yeni bir üründür. Handel-C, İletişim Ardışık Süreci (CSP) modelini takip etmektedir. Handel-C, tasarımcının bir süreç içerisindeki paralel işlem bloklarını açıkça tarif etmesini gerektirmektedir. Bu, SystemC 2.0'm yaptığı gibi süreçler arası iletişime yönelik bir iç yapı içerir.

2.2.1. XSG (Xilinx Sistem Üretici)

XSG, çeşitli Xilinx FPGA'lara uygulanabilecek birkaç donanım işlemine yönelik bir dizi Simulink blokları sağlamaktadır. Bu bloklar, Simulink ortamını kullanarak donanım sisteminin fonksiyonelliğini ve benzetimini yapmak üzere kullanılmaktadır. Çoğu DSP (Sayısal Sinyal İşleme) uygulamasının niteliği, veri gösterimine yönelik kayan noktalı sayı formatı gerektirmektedir. Simulink gibi yüksek seviyeli modelleme yazılımını çalıştıran çeşitli bilgisayar sistemlerinde bunu uygulamak kolay olsa da donanım yazılımında bu işlem, kayan noktalı sayı aritmetiğinin uygulama karmaşıklığından ötürü çok daha zordur. Sistem tasarımına daha sınırlayıcı kısıtların uygulandığı taşınabilir DSP sistemler ile bu zorluklar artmaktadır. Bu nedenlerden ötürü XSG, sistemdeki bütün sayısal değerleri göstermek için sabit noktalı sayı formatı kullanılmaktadır. Sistem üretici, benzetim ortamının yazılım tarafından ve donanım tarafından sağlanan verileri dönüştürmek üzere bazı bloklar sağlamaktadır [12].

Sistem üretici, FPGA tasarımına yönelik olarak MathWorks model-tabanlı Simulink tasarım ortamının kullanılmasına olanak tanıyan Xilinx'e ait bir DSP tasarım aracıdır. Tasarımlar, Xilinx'e özel bir blok seti kullanılarak DSP dostu Simulink modelleme ortamında yakalanmaktadır. Sentez, yerleştirme ve yönlendirme gibi FPGA'nın ileri seviye tüm uygulama adımları, bir FPGA programlama dosyası oluşturmak üzere otomatik olarak gerçekleştirilmektedir [13]. 90'dan fazla DSP yapı bloğu, Simulink'e yönelik olarak Xilinx DSP blok setinde sağlanmaktadır. Bu bloklar; toplayıcılar, çoğaltıcılar ve kaydediciler gibi genel DSP yapı bloklarını içermektedir. Gönderim yönünde hata düzeltim blokları, FFT'ler, filtreler ve bellekler gibi kompleks DSP yapı blokları dizisi de yer almaktadır. Bu bloklar, seçilen cihaz için optimize sonuçlar elde etmek üzere Xilinx IP çekirdek üreticilerini güçlendirmektedir [13]. Şekil 2'de genel DSP yapı blokları verilmiştir.



Şekil 2. Bazı DSP yapı blokları.

2.3. FIR filtre uygulamaları

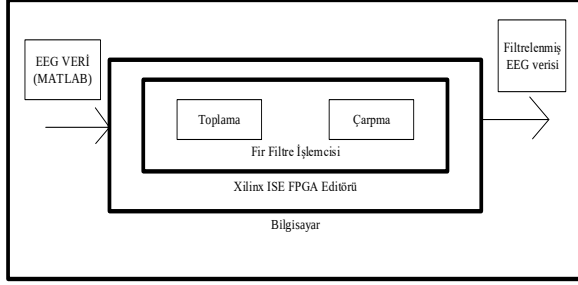
Bu bölümde MATLAB ortamında yapılan uygulamalar sunulmaktadır. Çalışmada iki uygulama bulunmaktadır. Her iki uygulamada da filtre olarak alçak geçiren 4. dereceden FIR filtre tasarımı kullanılmaktadır. Verilog dili kullanılarak yapılan uygulama, Xilinx FPGA ISE editörü ve kodlamanın gerçekleştirildiği bir bilgisayardan oluşmaktadır. EEG sinyalini filtrelemek için kullanılan FIR filtrenin katsayıları MATLAB FDATool (filtre tasarım aracı) kullanılarak oluşturulmuş, daha sonra FPGA'daki gömülü sisteme kodlanmıştır. XSG, FPGA'da verimli sayısal sinyal işleme algoritmaları tasarımında kullanılır. XSG kullanılarak yapılan uygulamadaki filtrenin parametre ve özellikleri, ilk uygulamada kullanılan filtrenin aynısıdır. Gerçekleştirilen filtre daha sonra Digilent Basys 2 kitinde yer alan Xilinx Spartan 3E-1600FG320 FPGA çipinde sentezlenmiştir.

2.3.1. Verilog HDL kodlama ile yapılan uygulama

Bu çalışmada, bir EEG sinyali FPGA platformunda Verilog HDL ile programlanan FIR filtre tasarımı ile işlenmiştir. Filtrelenmek için kullanılan EEG sinyali [14], The International Federation of Clinical Neurophysiology tarafından kaydedilmiştir.

MATLAB ortamında tasarlanan filtrenin bazı parametreleri $opass = 0.4$, $ostop = 0.6$, $Apass = 1$, $Astop = 5$ dB olacak şekilde alınmıştır. Elde edilen bu katsayılar EEG sinyalini filtrelemek için FPGA da oluşturulan FIR filtre işlemcisine programlanmıştır. FPGA tabanlı FIR filtre

işlemcisi olarak adlandırılan tasarım Şekil 3’de görülmektedir.



Şekil 3. FPGA tabanlı FIR filtre işlemcisine ait sistem

FIR Filtre işlemcisi, toplama ve çarpma aritmetik devrelerinden oluşmaktadır. -1 ile 1 arasındaki değerlere normalize edilmiş EEG sinyali sabit noktalı sayı gösterim formatına dönüştürülmüştür. Kullanılan tüm sayıların uzunluğu 16 bit seçilmiştir. Sayılar -1 ile 1 arasına normalize edildiğinden dolayı, $Qm.n$ sayı gösterme biçimi $Q3.13$ olarak düzenlenmiş olup, burada m ondalıklı sayının tamsayı kısmını ve n ondalıklı kısmını temsil etmektedir.

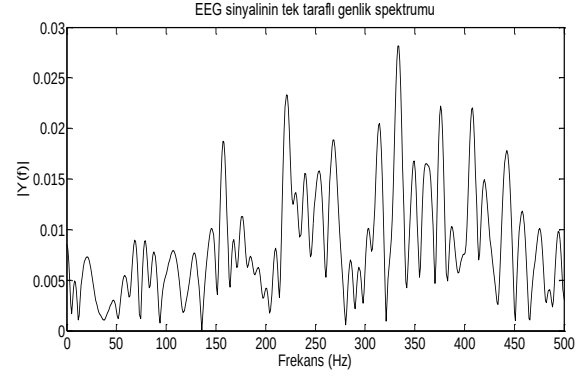
Kullanılan tüm sayılar işaretli sayı olduğundan, işaret biti için 1 bit ayrılmıştır. Dolayısıyla, sayı gösterim biçimi son olarak $Q2.13$ 16 bitlik işaretli sabit noktalı sayı gösterim biçimi olarak MATLAB programında düzenlenmiştir. Bu durumda sayıların hassasiyeti $0,122 \times 10^{-4}$ olarak elde edilmiştir.

Filtre derecesi 4 olarak seçildiğinden, filtrenin 5 adet katsayısı bulunmaktadır. Bu katsayılar; $a_0 = -0.125$, $a_1 = 0.375$, $a_2 = 0.515$, $a_3 = 0.375$ ve $a_4 = -0.125$ olarak elde edilmiştir.

EEG sinyalinin filtrelenmesi sırasında veri, giriş olan $x(n)$ için 14 değer ve çıkış olan $y(n)$ için 10 değer olarak işlemciye transfer edilmiştir. Kullanılan EEG sinyali 160 veriye sahiptir. Filtre tasarımı, her çalıştırmada 10 giriş verisi işleyebildiğinden dolayı, toplamda 16 kez çalıştırılmıştır.

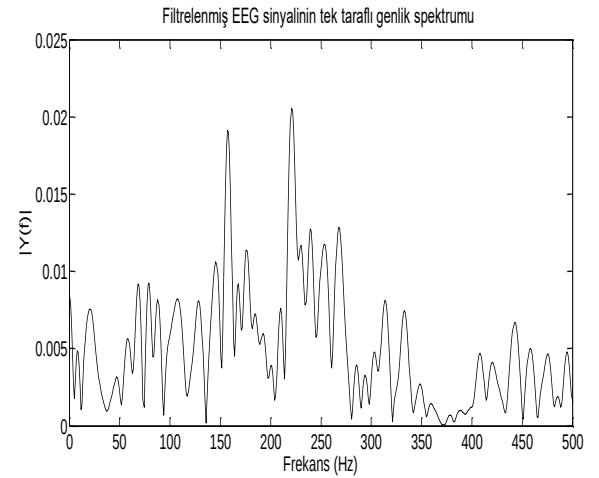
Toplama ve Çarpma Devreleri, Xilinx ISE FPGA editöründe programlanmış olup 2 saat çevrimi süresince cevap vermektedir [15]. Girişe verilen EEG sinyalinin işlenmesi için gereken toplam saat çevrimi sayısı 194’tür. Bu yüzden filtreleme işleminin tamamlanması 1940 ns sürmüştür. FIR Filtre İşlemci modelinde kullanılan EEG verisi MATLAB’tan işlemciye transfer edilmektedir. Filtreleme işlemi

sonrasında yeni giriş verisi tekrar filtreleme işlemi için işlemciye uygulanmaktadır. Gerçekleme sonucunda bütün filtrelenmiş veriler çizdirilmek üzere MATLAB’a transfer edilmektedir. Örnekleme frekansı (f_s) 1000 Hz alınarak orjinal EEG sinyalinin tek taraflı genlik spektrumu Şekil 4’de verilmiştir.

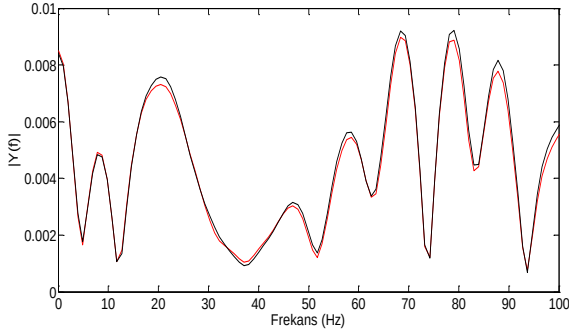


Şekil 4. Giriş EEG sinyalinin tek taraflı genlik spektrumu

Şekil 5’de filtrelenmiş EEG sinyalinin tek taraflı genlik spektrumu verilmiş olup yüksek frekans değerlerinde genliğin bastırıldığı görülmektedir. Düşük frekans değerlerinde ise tasarladığımız alçak geçiren 4. dereceden FIR Filtre özelliğinden dolayı giriş sinyaline oldukça yakın bir sinyal elde edilmiş olup Şekil 6’da siyah sinyal; giriş sinyalini, kırmızı sinyal ise çıkış sinyalini gösterecek şekilde 0-100 Hz frekans aralığında çizdirilerek neredeyse aynı genlikte oldukları ve filtreleme işleminin başarıyla gerçekleştirildiği gözlemlenmiştir.



Şekil 5. Filtrelenmiş EEG sinyalinin tek taraflı genlik spektrumu



Şekil 6. 0-100 Hz aralığında giriş ve çıkış sinyalinin spektrumları

2.3.2. XSG blokları ile yapılan uygulama

Bu uygulamada, EEG sinyali XSG kullanılarak önce MATLAB Simulink ortamında tasarlanan FIR Filtre ile filtre edilmiş ve daha sonra FPGA üzerinde gerçekleştirilmesi incelenmiştir.

Sistemde kullanılacak EEG sinyali MATLAB çalışma ortamından alınarak Xilinx Geçit Giriş bloğuna uygulanmıştır. Daha sonra Xilinx Geçit Giriş bloğundan alınan sinyal önce kayıt bloğuna sonra ise FIR Derleyici bloğuna uygulanmıştır. FIR Derleyici bloğunda kullanılan filtre, FDA Tool bloğu tarafından tasarlanmıştır.

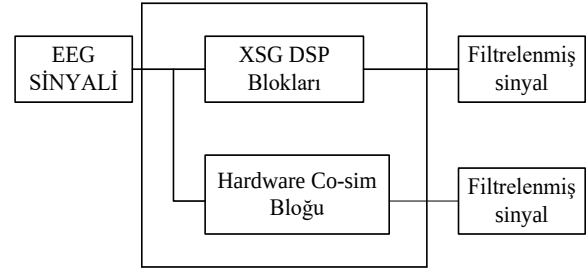
Filtre tasarlandıktan sonra filtre katsayıları, FIR Derleyici bloğuna tanımlanmak üzere MATLAB çalışma ortamına aktarılmıştır. Filtre katsayılarının aktarımından sonra FIR Derleyici 5.0 bloğuna girilerek kullanacağımız filtrenin katsayıları FIR Derleyici bloğuna tanıtılmıştır. FIR Derleyici 5.0 bloğundan alınan sinyal tekrar kayıt bloğuna uygulanıp daha sonra Xilinx Geçit Çıkış bloğuna uygulanmıştır. Xilinx Geçit Çıkış bloğundan alınan sinyal MATLAB çalışma ortamına aktarılıp tekrardan çizdirilmiştir.

MATLAB Simulink ortamında tasarlanan sistemin FPGA'da gerçekleştirmesini yapabilmek için FPGA kartını temsil eden "JTAG Co-sim" bloğu XSG tarafından oluşturulur. Bu bloğu oluşturmak için önce Sistem Üretici bloğuna girilir. Sistem Üretici bloğuna girildikten sonra açılan pencerede "Compilation" bölümünden Bitstream seçeneği seçilir. Sonrasında altında bulunan "Part" bölümünden kullanılan FPGA kartı modeli seçilir. Bu çalışmada Spartan-3E XC3S1600E-4FG320 kullanılmıştır. Daha sonra programlamada gerekli olan ".bit" uzantılı dosya

ve verillog yazılımı oluşturulur. Oluşturulan JTAG Co-sim bloğu Şekil 7'de gösterilmiştir. Bu blok, Xilinx Geçit Giriş bloğu ve Xilinx Geçit Çıkış blokları dahil arasındaki blokların gerçekleştirdiği işlemleri FPGA kartında yapan tek bir bloktur. Oluşturulan model ise Şekil 8'de gösterilmiştir.

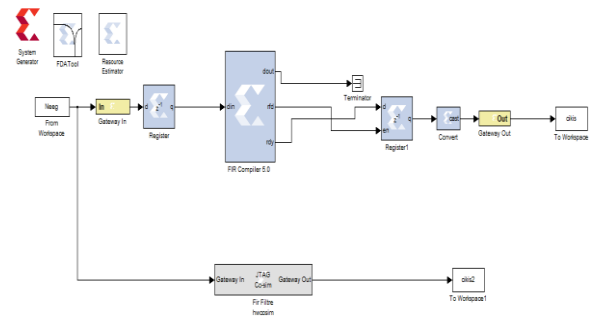


Şekil 7. Oluşturulan JTAG Co-sim bloğu



Şekil 8. Oluşturulan model gösterimi

Donanım eş zamanlı benzetim bloğu kullanılarak tasarlanan Simulink tabanlı 4. derecen FIR filtre modeli Şekil 9'da gösterilmektedir. Model çalıştırıldığında ".bit" uzantılı dosya USB portu üzerinden FPGA kartına gönderilir. Program çalıştırdıktan sonra giriş sinyalimiz olan EEG sinyali XSG DSP bloklarından ve aynı anda donanım eş zamanlı benzetim bloğundan geçerek FPGA kartı üzerinde filtrelenen sinyal filtrelenmiş şekilde çizdirilmiştir. Şekil 6'daki sonucun aynısı elde edilmiştir. Bu işlem seri ve sayısal olarak gerçekleştirilmiştir. FIR filtre uygulamalarına ait kaynak tüketimi Tablo 1'de verilmektedir.



Şekil 9. Donanım eş zamanlı benzetim bloğu kullanılarak oluşturulan Filtre modeli

Tablo 1. Uygulamaların donanım üzerindeki kaynak tüketimi.

Donanımsal kaynaklar	Kullanım Sayısı	
	Kodlama ile yapılan tasarım	XSG ortamındaki tasarım
Lojik Dilim	12145	2231
Flip-Flop	14523	2612
Doğruluk Tablosu (LUT)	21785	3364

Tablo 1'deki veriler incelendiğinde XSG kullanılarak yapılan 4. dereceden alçak geçiren FIR filtrenin kaynak kullanımının daha az olduğu görülmüştür. Bu nedenle 4. dereceden alçak geçiren FIR filtrenin XSG kullanılarak gerçekleştirilmesinin, performans açısından daha iyi olduğu sonucuna varılmıştır.

3. Sonuçlar

Bu çalışmada MATLAB Simulink ile uyumlu çalışan XSG ve FPGA yazılım dili olan Verilog kullanılarak 4. dereceden alçak geçiren FIR filtre gerçekleştirilmiştir. Filtreleme işlemi için giriş sinyali olarak EEG sinyali kullanılmıştır. Bu çalışmanın sonucunda FPGA'nın hızından ve paralel işlem yeteneğinden dolayı tasarlanan sayısal filtrelerin filtreleme işlemini başarılı bir şekilde gerçekleştirdiği gözlemlenmiştir. Bu çalışmada yapılan filtre tasarımları görüntü işleme, sinyal işleme, haberleşme sistemleri gibi uygulamalar için kişiselleştirilebilen gerçek zamanlı bir sayısal filtre uygulamak için büyük kolaylıklar sağlar.

Kaynak kullanımları bakımından karşılaştıracak olursak XSG kullanılarak tasarlanan filtrenin daha az kaynak kullandığı görülmüştür.

4. Kaynaklar

1. DeHon A. (2000), The density advantage of configurable computing, *Computer*, **33** (4): 41-49.
2. Qasim S.M., Abbasi S.A., Almashary B. (2009), An overview of advanced FPGA architectures for

optimized hardware realization of computation intensive algorithms, In *Multimedia, Signal Processing and Communication Technologies, IMPACT'09*, 300-303.

3. Bıçakcı S., Çetinkaya M.B., Karaboğa N., (2005), Sayısal FIR Süzgeç İçin Vhdl Kod Geliştirilmesi, *Elektrik-Elektronik Bilgisayar Mühendisliği 11. Ulusal Kongresi ve Fuarı, İSTANBUL*, 332-334.

4. Louzao J, Paz S, Tejera D, Bellora G, Langwagen G., (2003), Architectural design of a programmable cell for the implementation of a filter bank on FPGA, *Microelectronics Reliability*.

5. Re M., Cardarilli G.C., Re A.D., Lojacona R., (2000), FPGA Implementation of a Demux Based on a Multirate Filter Bank, *ISCAS 2000 – IEEE International Symposium on Circuits and Systems*.

6. Lee H, Sobelman G.E., (1999), Performance evaluation and optimal design for FPGA- based digit-serial DSP functions, *Computers and Electrical Engineering*.

7. Anurag A., Astha S., Tushar N., (2013), FIR Filter Designing using Xilinx System Generator, *International Journal of Computer Applications* 68 (11).

8. Emmanuel S., Kolawole H., Warsame A., Cofie P., Fuller J., Tolliver C., Pamela O., (2015), Design and Implementation of Low-Pass, High-Pass and Band-Pass Finite Impulse Response (FIR) Filters Using FPGA *Circuits and Systems*, **6**, 30-48.

9. Murat D., (2013), Video frekans uygulamaları için a-sınıfı logaritmik ortam epileptik filtre tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

10. Batık Z., (2011), Sayısal Filtre Tasarım Yöntemleri Ve Performans Analizleri, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

11. Ertürk S., Sayısal işaret işleme, Birsan Yayınevi, İstanbul, 293.

12. Areibi S., (2016), Tutorial - Using Xilinx System Generator 14.6 for Co-Simulation on Digilent NEXYS3 (Spartan-6) Board.

13. Xilinx, https://www.xilinx.com/support/documentation/sw_manuals/xilinx11/sysgen_gs.pdf

14. Clin N., (2006), American Clinical Neurophysiology Society. Guideline 8: guidelines for recording clinical EEG on digital media. **23(2)**:122–124.

15. Karakaya B., Yeniceri R., Yalcın M.E., (2015), Wave computer core using fixed-point arithmetic, *2015 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*, 1514-1517.

FIRAT ÜNİVERSİTESİ MÜHENDİSLİK BİLİMLERİ, FEN BİLİMLERİ DERGİSİ
TURKISH JOURNAL OF SCIENCE AND TECHNOLOGY (TJST)
YAZIM ESASLARI / GUIDE FOR AUTHORS
<http://www.firat.edu.tr>

Açıklama/Description

Fen ve Mühendislik Bilimleri alanlarında özgün araştırma makaleleri (orijinal bir araştırmayı bulgu ve sonuçlarıyla yansıtan, bilime ve teknolojiye katkı sağlayan çalışmalar) Türkçe dilde Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri ve Fen Bilimleri Dergilerinde, İngilizce olarak da "Turkish Journal of Science and Technology" dergisinde (uluslararası danışma kurulu ve hakemli) yayımlanır. Yazıların telif hakkı devri (copyright), dergi internet sayfasında sunulan form doldurulup imzalanmak suretiyle editörlüğe sunulur. Her yazı, konusu ile ilgili **3 (üç)** hakeme gönderilerek şekil ve içerik bakımından incelenir. Hakem görüşlerinde belirtilen eksikler tamamlandıktan sonra dergide yayınlanabilecek nitelikteki makaleler, yazarlar tarafından son baskı formatında editöre iade edilir. Dergide baskı taslağı (draft) haliyle makale içinde bulunabilecek hataların sorumluluğu yazarlara aittir.

Yazışma Adresi/Corresponding adress: Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi Editörlüğü, Fırat Üniv., Fen Bilimleri Enstitüsü 23119- Elazığ.
e-mail: fenbilim@firat.edu.tr
Tel: 0424 2122707, Fax: 0424 2369955

İLK SUNUŞ FORMATI /Submission of Manuscript

Metin; sayfanın tek yüzüne, bilgisayar ile Office 2000 veya daha üst bir yazı programı kullanılarak çift aralıklı, kenarlarda yeterli boşluk (25 mm) bırakılarak, Times New Roman karakteri ve 12 punto kullanılarak A4 (210x297mm) formunda beyaz kağıda yazılmalıdır. Eserler, kaynaklar ve şekiller dahil 15 sayfayı geçmemelidir (baskı formatında max. 10 sayfa). Şekil, grafik, resim ve formüller orijinal veya temiz ve net bir şekilde bilgisayardan baskıya hazır halde üretilmiş olmalıdır. İlk sunuş formatında, üst bilgi ve alt bilgi kısmına hiç bir şekilde yazı yazılmamalı yalnızca alt bilgi kısmında belgeye sayfa numarası verilmelidir. Belge içinde hiçbir şekilde otomatik numaralandırma kullanılmamalıdır. Yazılar, biri orijinal ikisi fotokopi olmak üzere 3 nüsha olarak word formatında sunulmalıdır. Her başvuru bir **kapak yazısı** (iletişimde bulunulacak yazar bilgileri belirtilerek) ile yapılmalıdır. Çalışma herhangi bir kurumun desteği ile gerçekleştirilmiş ise, çalışmayı destekleyen kurumun adı ilk sayfa altına dipnot şeklinde yazılmalıdır.

1. Eserin bölümleri/Divisions: Şu sıraya uygun olmalıdır: Başlık, Özet, Anahtar kelimeler, Title, Abstract, Keyword; 1. Giriş, 2. Materyal ve Metot, 3. Sonuçlar 4. Tartışma, 5. Teşekkür (Gerekliyse), 6. Kaynaklar (basılmış eserlere atıf verilmemelidir).

2. Kapak Sayfası/First Page: Başlıklar çalışmayı ve çalışmanın amacını tanımlayıcı şekilde kısa ve açık olmalıdır. **(Türkçe Başlık Ortali 12 Punto, İngilizce Başlık Ortali 11 Punto Olarak Verdane Fontu ile Kalın (Bold) Kelimelerin ilk Harfleri Büyük Olarak Yazılmalıdır.** (Semboller ve kısaltmalar için küçük harfler kullanılabilir). Başlığın altına, eserin yazar yada yazarlarının adı-soyadı ile posta ve sorumlu yazarın e-mail adresleri yazılmalıdır.

3. Özet/Abstract: Özet 200 kelimeyi geçmeyecek şekilde Türkçe ve İngilizce yazılmalıdır. İngilizce özetin başına

eserin başlığı aynı dilden yazılmalıdır. Özetlerin sonunda anahtar kelimeler yer almalıdır.

4. Metin/Text: Genel olarak Giriş, Materyal ve Yöntem, Bulgular ve Sonuç ilişkisi kısımları kapsar. **Tüm başlıklar Bold, kelimelerin ilk harfleri büyük yazılmalıdır.**

5. Semboller/Symbols: Metin içinde kullanılan sembollerin tamamı bu başlık altında verilir. Gerekliğinde "Yunan Harfleri", "Alt İndis" gibi alt başlıklar kullanılabilir.

6. Kaynaklar/References: Metinde parantez içerisindeki [1], [2] vb. rakamlarla numaralandırılmalı (Örnek 1: Bölücek ve diğ. [1] tarafından Örnek 2: Çakır ve Aşkın [5] Baskıl dolayları Örnek 3:taksonomide kullanılmaktadır [6, 8-12]) ve metin sonunda da eser içinde veriliş numara ve sırasına göre yazılmalıdır.

Kaynaklarda literatürün verilmesi;

Makaleler

Örnek 1: Yang, C.M., Chang I.F., Lin, S.J. and Chou, C.H. (2004). Effects of three allelopathic phenolics on chlorophyll accumulation of rice (*Oryza sativa*) seedlings: II. Stimulation of consumption-orientation. *Bot. Bull. Acad. Sin.*, **45**: 119-125.

Örnek 2: Turan, M. (1996). Şiran (Gümüşhane) doğu yöresinin tektonik özellikleri. Karadeniz Teknik Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü *30. Yıl Sempozyumu, (16-20 Ekim 1995) Bildirileri*, S. Korkmaz ve M. Akçay (Editörler), Trabzon, 275-292.

Kitaplar

Örnek 3: Tatar, Y. (1995). Jeolojik Harita Bilgisi. Fırat Üniversitesi Yayınları, No: 43, Elazığ, 297s.

Kitaptan bir bölüm

Örnek 4: Sarıtaş, S., Davies, T.J. (1987). "Reduction of Oxide Inclusions During Pre-Forging Heat Treatments" in Powder Metallurgy for Full Density Products, New Perspectives in Powder Metallurgy, Cilt 8, (Ed) Kulkarni, K.M., Metal Powder Industries Federation, Princeton, NJ, A.B.D, 417-430.

Tezler

Örnek 5: Bilhan, Ö. (2005). Labirent savakların hidrolik karakteristiklerinin deneysel olarak incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 64s.

7. Tablo ve Şekiller/Tables and Figures: Tablo içermeyen bütün görüntüler (fotoğraf, çizim, diyagram, grafik, harita vs.) şekil olarak isimlendirilmelidir. Her bir Tablo ve Şekil metin içindeki sıralanmasına göre numaralandırılmalıdır. Tablo başlıkları tablonun üstüne, şekil başlıkları şeklin altına konulmalıdır. Tablo başlıkları tablonun üst satırında tablo içerisine yerleştirilmelidir ve Tablo yazısının yerleştirildiği bu kısımdaki tablo çizimleri çıktıda görünmez yapılmalıdır. Şekillerde asla el yazısı kullanılmamalı ve Tablolardaki yazılar hiç bir zaman 8 puntodan küçük olmamalıdır.

YAYINA KABUL EDİLEN MAKALELERİN BASKI FORMATI

	Açıklama	Kontrol
Genel	Hakem değerlendirmesinden sonra yayına kabul edilen makaleler, yazarları tarafından baskı formatında yeniden düzenlenerek, 1 adet basılmış orijinal kopya ve bir cd ile editörlüğe gönderilir. Makalelerin basımı sırasında editörlüğün formatla ilgili uygulamaları dışında hiç bir dizgi işlemi yapılmayacaktır. Makaleler Office 2000 veya üstü ile yazılmalıdır. Metin, Times New Roman Türkçe karakteri ve tek satır aralığı kullanılmalıdır.	
Sayfa Yapısı ve düzeni	Makale başlığından Keywords' un sonuna kadar olan kısım tek sütun halinde düzenlenmelidir. Giriş'ten itibaren makale 7,68 cm genişliğindeki çift sütun halinde yerleştirilmelidir (sütunlar arası boşluk 0,64 cm). Sayfa düzenlemede, üst 35 , sol ve sağ 25 mm ve alt 30 mm olmalıdır. Üstbilgi ve altbilgi 2,5 cm olmalıdır. Üstbilgi, tek ve çift sayfalarda farklı ve ilk sayfada farklı seçenekleri işaretlenmelidir. Üstbilgiler 8 punto Times New Roman fontunda olmalıdır.	Lütfen sayfa yapısı ve düzenine dikkat ediniz.
Türkçe Başlık	Makale başlığı Verdana fontuyla 12 punto , sadece baş harfleri büyük olacak şekilde, ortalı ve koyu (bold) olarak yazılmalı ve Türkçe başlıktan önce ve sonra 18 nk (paragraf'tan) bırakılmalıdır.	
Yazar Adları	Yazar adları Times New Roman fontu ile ortalı, koyu ve 11 punto olarak yazılmalıdır. Yazar adları ile adres arasında boşluk olmamalıdır.	
Adresler	Adresler Times New Roman fontu ile ortalı ve 10 punto olarak yazılmalı. Sadece sorumlu yazarın e-posta adresi, adres satırlarının alt kısmına yine aynı font ve punto ile yazılmalıdır. (Geliş/Received: **.*.200*; Kabul/Accepted: **.*.200*) satırından önce 6 nk ve sonra 12 nk bırakılmalıdır. Adresin hemen alt satırında boşluk bırakmadan 10 punto ile e-posta adresi yazılmalıdır.	
Özet	Özet'ten sonra 6 nk boşluk bırakılmalıdır. "Özet" 10 punto , koyu olarak yazılmalı, baş harfi büyük ve ilk satırın başında yazılmalıdır. Özet metni 10 punto , tek paragraf olacak ve ilk satırda girinti yapılmayacak şekilde yazılmalıdır.	
Anahtar Kelimeler	Özet metninden sonra, 6 nk boşluk bırakıldıktan sonra 9 punto ile yazılmalı. En az 3 ve en çok 6 tane anahtar kelime baş harfleri büyük olacak şekilde yazılmalıdır. Anahtar kelimelerden sonra 12 nk boşluk olmalıdır.	
İngilizce Başlık	Sadece baş harfleri büyük, ortalı ve koyu olarak Verdana fontu ile 11 punto olarak yazılmalıdır. Keywords'den önce 6 nk bırakılmalıdır.	
Abstract	"İngilizce başlıktan sonra 6 nk boşluk bırakılmalıdır. "Abstract" 10 punto , koyu olarak yazılmalı, baş harfi büyük ve ilk satırın başında yazılmalıdır. Abstract metni 10 punto , tek paragraf olacak ve ilk satırda girinti yapılmayacak şekilde yazılmalıdır.	
Keywords	Abstract metninden sonra 6 nk boşluk bırakıldıktan sonra 9 punto ile yazılmalı. En az 3 ve en çok 6 tane anahtar kelime baş harfleri büyük olacak şekilde yazılmalıdır.	
Başlıklar	Başlıklar numaralandırılmalı, 1. derece başlıklarda tüm kelimelerin baş harfleri büyük, diğerlerinde ise sadece ilk kelimenin baş harfi büyük olmalı ve koyu olarak yazılmalıdır. Başlıklardan önce ve sonra bir boşluk bırakılmalı. Başlıklar sola dayalı olmalıdır.	
Metin	Metin, Keywords 'den sonra 12 nk boşluk bırakılarak tek satır aralıklı 11 punto ile yazılmalıdır. Paragraf girintisi 0.7 cm olmalı ve paragraflar arası boşluk bırakılmamalıdır.	Lütfen paragraf girintisine dikkat ediniz.
Tablo	Her bir Tablo ve Şekil metin içindeki sıralanmasına göre numaralandırılmalıdır. Tablo başlıkları Tablonun üst satırında Tablo içerisine yerleştirilmeli ve bu çizgiler görünmez yapılmalı, Tablo ile arasında boşluk bırakılmamalı ve 10 punto ile ortalı yazılmalıdır. "Tablo 1." koyu yazılmalı, açıklaması sadece ilk kelimenin baş harfi büyük olmalı ve bold olmamalıdır. Tablo içerisindeki yazılar 9 punto olmalıdır. Eğer gerekirse 8 punto da olabilir.	
Şekiller	Şekillerin altına 10 punto ortalı olmalıdır. "Şekil 1." koyu yazılmalıdır. Şekil açıklamasından sonra bir boşluk bırakılmalıdır. Şekil yazısı koyu yazılmamalıdır.	
Kaynaklar	İlk sunum ile aynı olmalı ve 10 punto ile yazılmalıdır. Lütfen bir önceki sayfaya bakınız. Örnek: 1. Nurusawa, U. (1999). The second law analysis of mixed convection in rectangular duct. <i>Heat Mass Transfer</i> , 35 , 499-506.	Lütfen kaynakların yazım kurallarına dikkat ediniz.
Not: Makale çift sütuna dönüştürüldüğünde; özellikle sayfa numaraları ve alt ve üstbilgi verildiği zaman makalede tablolar, şekiller vb. değişmekte, karışıklık olabilmektedir. Çift sütun olmayacak kısımların üst satır sonu Ekle →Kesme→Sürekli seçilerek ayarlanabilir. Bu işlemi Şekil ve Tablodan önceki satırın sonunda, Şekil ve Tablodan sonraki satırın başında da yapmak gerekir. Kesme işlemini Kaynaklar yazısından önceki cümlelerin sonuna ve Kaynakların sonuna da yapmak gerekmektedir. Dosya→Sayfa yapısı→Düzen'den altbilgi ve üstbilgi 2,5 cm seçilmeli, tek ve çift sayfalarda farklı ve ilk sayfada farklı seçenekleri işaretlenmelidir.		
Makale dizgisinin doğruluğunu kontrol için, Ekle'den sayfa numaraları vererek her sayfaya doğru olarak numara verilip verilmediği kontrol edilmelidir. Aynı şekilde Görünüm'den ilk sayfada, tek sayfalarda ve çift sayfalarda üstbilgi verip doğruluğu web sitemizdeki örnekte yazılanlar yazılarak kontrol edilmelidir.		



Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi

Telif Hakkı Devir Formu / Copyright Form

Biz aşağıda gerekli bilgileri bulunan,

[Yazarların Adı / Author names]

.....tarafımızdan yazılmış,

[Makale Adı / Article title]

.....

başlıklı makale içeriği, sunduğu sonuç, bilgi, bulgu ve yorumları konusunda, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Editörlüğü'nün hiç bir sorumluluk taşımadığını kabul ederiz.

Sunduğumuz makalenin orijinal olduğunu; herhangi bir başka dergiye yayınlanmak üzere gönderilmediğini; daha önce yayınlanmadığını; tümüyle yada bir bölümü herhangi bir kongre/sempozyum da sunulup fakat tam metin olarak basılmadığını ve orijinal telif hakkı devri formu ile birlikte Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Editörlüğü'ne gönderildiğini garanti ederiz.

Makalenin telif hakkından feragat etmeyi kabul ederek sorumluluğu üstlenir ve imza ederiz. Bu vesileyle makalenin telif hakkı Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü' ne devredilmiştir. Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Editörlüğü makalenin yayınlanabilmesi konusunda yetkili kılınmıştır. Bununla birlikte yazarların aşağıdaki hakları saklıdır:

Aşağıdaki ve diğer bütün durumlarda makalenin Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi tarafından yayınlandığına dair referans verilmelidir.

1. Telif Hakkı dışında kalan patent v.b. bütün tescil edilmiş haklar.
2. Makaleyi satmamak koşulu ile kendi amaçları için çoğaltma hakkı.
3. Yazarın gelecekteki kitaplar ve dersler gibi çalışmalarında; makalenin tümü ya da bir bölümünü ücret ödemeksizin kullanma hakkı.

Bütün yazarlar tarafından imzalanması gerekiyor: (Sorumlu yazar/Corresponding author*)

Yazarın Adı ve Soyadı / Author Names

İmzası / Signature

Tarih / Date

1

2

3

4

5

NOT: Eksik imza durumunda sorumluluk imzalayan yazarlara aittir. Lütfen formu doldurunuz, imzalayanız ve aşağıdaki adrese metinle birlikte gönderiniz.

Adres: Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi Editörlüğü, F.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, 23119-Elazığ.

