

Meslek Lisesi Öğrencilerinin İş Sağlığı ve Güvenliği Hakkındaki Tutumları

The Attitudes of Vocational High School Students on Occupational Health and Safety

Yunus ÖZTÜRK¹ 

¹Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İş Güvenliği Ana Bilim Dalı, 34772, İstanbul, Türkiye

Öz

Genç işçilerin kaza geçirme oranlarının diğer yaş guruplarındaki işçilere göre daha çok olduğu bilinmektedir. Bu yüzden ileriki yıllarda birer genç işçi olarak çalışma hayatına katılacak meslek lisesi öğrencilerine iş sağlığı ve güvenliği (İSG) eğitimi vermek büyük önem arz etmektedir. Yapılan bu çalışmada Fethiye Mustafa Kemal Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi'nde okuyan 10. ve 11. sınıf öğrencilerinin iş sağlığı ve güvenliği hakkında genel bilgi düzeyleri ölçülmeye çalışılmıştır. Bunun için anket çalışması yapılmış ve sonuçları incelenerek değerlendirilmiştir.

Daha önce yayımlanmış bir çalışmadan yararlanılarak hazırlanan 15 sorudan oluşan bir anket, meslek lisesindeki 10. ve 11. sınıflardaki 216 öğrenciye uygulanmıştır. Anketin istatistiksel güvenilirliği için belirli sayıdaki öğrenci grubuna değişik zamanlarda iki kez uygulanmış ve çıkan sonuçların birbirine %97 oranına yakın olduğu görülmüştür (Test- tekrar test yöntemi). Bu çalışmanın sonucunda; öğrencilerin bazı eksiklikleri olmakla birlikte, genel İSG kurallarını öğrendikleri ve çalışırken bu kurallara uydukları görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Meslek liselerinde İSG, İSG eğitimi, KKD, İş kazası

Abstract

It is known that the rate of accident among young workers is higher than that of workers in other age groups. Therefore, it is very important to provide occupational health and safety(OHS) education to vocational high school students who will participate in working life as young workers in the following years. In this study, it was aimed to measure the general knowledge levels of occupational health and safety of 10th and 11th grade students in Fethiye Mustafa Kemal Vocational and Technical Anatolian High School. For this purpose, a survey was conducted and the results were examined and evaluated.

A questionnaire consisting of 15 questions prepared by using a previously published study was applied to 216 students in Grades 10 and 11 in vocational high school. For the statistical reliability of the questionnaire, it was applied twice to a certain number of students at different times and the results were close to 97% (Test-retest method). As a result of this study; although the students have some deficiencies, it is seen that they have learned the general OHS rules and obeyed these rules while working.

Keywords: Occupational High Schools, OHS, OHS Education, Work Accident

GİRİŞ

Mustafa Kemal Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi 1981 yılından buyana eğitim ve öğretime devam eden Fethiye'nin köklü liselerinden birisidir. Lise bünyesinde Tesisat teknoloji ve iklimlendirme, Elektrik ve Elektronik, İnşaat, Harita ve Tapu Kadastro, Gemi Yapımı, Bilişim ve Mobilya Dekorasyon alanları bulunmaktadır. Yaklaşık 1000 öğrencisi bulunan lise her yıl 200-250 öğrenciyi mezun etmektedir. Bu da her yıl bu sayılara yakın genç işçinin çalışma hayatına katıldığı anlamına gelmektedir. Çalışanlar arasında genç işçilerin kaza geçirme oranlarının yüksek olduğu[1] göz önünde bulundurulduğunda lise öğrencilerinin İSG eğitimlerinin önemi ortaya çıkmaktadır.

Önceki yıllarda İSG konuları Milli Eğitim Bakanlığına bağlı meslek liselerinde ayrı bir ders olarak okutulurken, daha sonraki yıllarda bu ders kaldırılmış ve İSG eğitimlerinde süreklilik sağlanamamıştır. Günümüzde ise İSG konuları 9. Sınıf mesleki gelişim dersinin bir ünitesi olarak işlenmektedir. Bununla birlikte 12. Sınıftaki işletmelerde beceri eğitimi dersine hazırlık amacıyla; 11. sınıf öğrencilerine 8 saatlik İSG eğitimi verilmektedir.

Bu eğitimler okuldaki İSG sertifikasına sahip öğretmenler tarafından düzenlenmektedir. Ayrıca düzenlenen eğitimlerin içerikleri; çalışanların İSG eğitimlerinin usul ve esasları hakkındaki yönetmelikte belirtilen konulara göre hazırlanmaktadır[2].

6331 sayılı İSG kanunu yürürlüğe girdikten sonra, öğrencilerin staj ve işletmelerde beceri eğitimi dersleri için sözleşme imzalayacakları firmaların ortak sağlık ve güvenlik birimleriyle İSG sözleşmesi yapıp yapmadıkları önem kazanmıştır. Okul yönetimi; özellikle kendisinden başka çalışanı bulunmayan işverenlerden, ortak sağlık güvenlik birimleriyle stajyer öğrenciler için özel İSG sözleşmesi yapmalarını istenmektedir. Bu sözleşmeyi yapmak istemeyen işyerlerine öğrenciler verilmemektedir.

Meslek liselerinde iş kazaları yoğunlukla öğrencilerin atölye çalışmaları esnasında meydana gelmektedir. Bu kazaların önüne geçilmesinde öğrenciler için İSG eğitimlerinin büyük önemi vardır. Özellikle Tesiat Teknolojisi ve iklimlendirme, Elektrik, Gemi yapımı, İnşaat ve Mobilya Dekorasyon alanlarında kullanılan makineler ve el aletleri; öğrenciler ve öğretmenlerin sağlığı için büyük riskler barındırmaktadır. İSG eğitimleri; öğrencilerin bu makine ve aletlerden kaynaklanan tehlike ve risklerin farkına varmaları ve bu risklerden kaçınmaları için verilmektedir. Yine bu eğitimlerle öğrencilerin güvenlik kurallarına uymaları ve gereksiz risklerden kaçınarak güvenli çalışmayı davranış haline getirmeleri amaçlanmaktadır.

Ülkemizin iş kazaları ve işçi ölümlerinde Avrupa Birliği üyeleri arasında maalesef birinci sırada olması[3], ülke sanayisine kalifiye eleman yetiştirme amacıyla olan meslek liselerinde verilen İSG eğitimlerinin önemini ortaya koymaktadır.

II. YÖNTEM

Bu çalışmanın amacı Mustafa Kemal Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi'nde öğrencilerin İSG kuralları hakkındaki tutum ve davranışlarını belirlemektir.

2.1.Araştırma Modeli

Bu çalışma, nicel araştırma yöntemlerinden betimsel tarama modeli kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tarama modeli, geçmişte ya da halen var olan bir durumu var olduğu şekliyle betimlemeyi amaçlayan araştırma yaklaşımıdır. Araştırmaya konu olan olay, birey ya da nesne, müdahale edilmeksizin kendi koşulları içinde ve olduğu gibi tanımlanmaya çalışılır. Bu çalışmadaki anket soruları daha önce yayınlanmış bir makaleden yararlanılarak hazırlanmıştır[4].

2.2.Çalışma Gurubu

Araştırmanın evrenini Mustafa Kemal Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi'nde okuyan 10. ve 11. Sınıf

öğrencileri oluşturmaktadır. Örnekleme bu sınıflardaki 216 öğrenciye uygulanarak yapılmıştır.

2.3.Veritoplama Aracı

Mustafa Kemal Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi'nde İSG eğitiminin yeterliliğini belirlemek amacıyla lise öğrencilerine anket çalışması yapılmış ve öğrencilerin İSG hakkında bilgilerinin ne olduğu belirlenmiştir. Kullanılan anket 15 sorudan oluşmaktadır ve beşli Linkert[5] ölçeğine göre hazırlanmıştır. Anket sonuçlarının istatistiksel analizleri yapılmıştır.

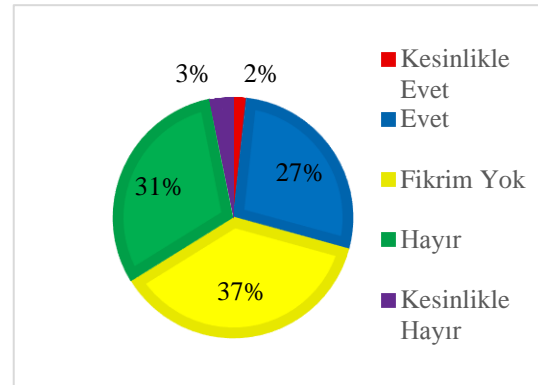
2.4.Verilerin Çözümlemesi

Her soru için alınan sonuçlar grafikler halinde verilmiştir. Elde edilen veriler betimsel analiz yöntemiyle değerlendirilmiştir.

Bu tip araştırmalar ile olgular hakkında sistemli ve düzenli bilgilere sahip olunur. Betimleyici bir araştırmada herhangi bir ilişkinin varlığı veya yoluğu araştırılır. Örneklemeden hareketle evren hakkında geniş bir bilgi sahibi olunur. Yeni hipotezlerin formüle edilmesi kolaylaşır. Betimleyici araştırmalar bize o olgunun niçin öyle olduğunu, o ilişkinin niçin öyle kurulduğunu açıklamazlar. Onun yerine olgularda neyin olduğunu, nelerin neler ile birlikte olduğunu bildirirler. Betimleyici araştırmaların sonuçları, yüzde tabloları, grafikler ile gösterilir ve değişkenler arasında ilişkinin varlığı veya yokluğu saptanır[6].

III. BULGULAR

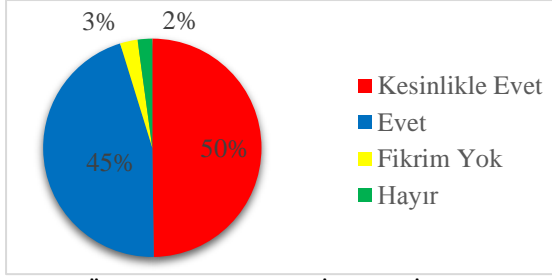
1. 6331 sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği kanunu hakkında bilginiz var mı?



Şekil 1. İSG Kanununun Öğrenciler Arasındaki Farkındalığı

Şekil 1'deki bulgulara göre 6331 sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu hakkında bilgisi olan öğrenci sayısı çok azdır. Oran %29 dur.

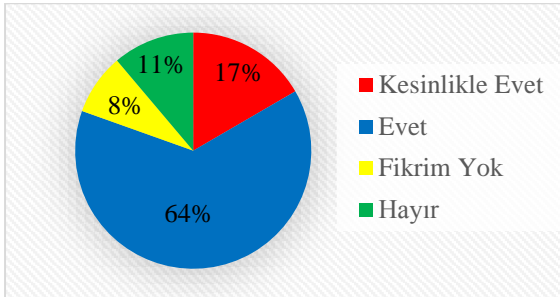
2. İş sağlığı ve güvenliğinin iş hayatınızı etkilediğini düşünüyor musunuz?



Şekil 2. Öğrenciler Açısından İSG'nin İş Hayatındaki Önemi

Şekil 2'deki bulgular öğrencilerin %95'inin iş sağlığı ve güvenliğinin çalışma hayatını etkilediğini düşündürmektedir.

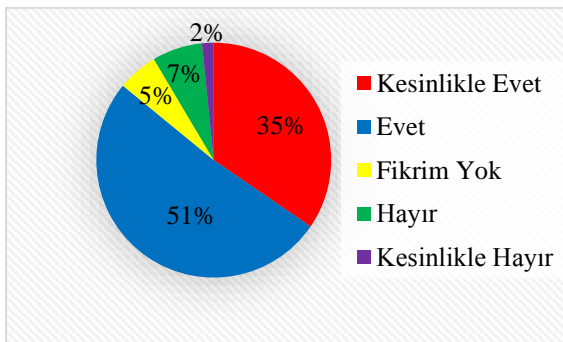
3. Lise eğitiminiz boyunca işçi sağlığı ve güvenliği hakkında size bilgi verildi mi?



Şekil 3. Öğrencilere Lise Eğitimleri Boyunca İSG Hakkında Bilgi Verilme Durumu

Şekil 3'teki bulgular öğrencilerin %81'nin bilgilendirildiğini göstermektedir.

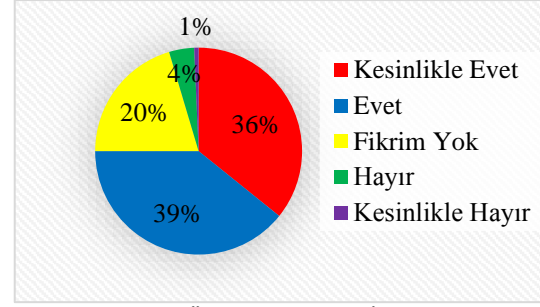
4. Atölyelerde buluna İSG uyarı levhalarını çalışırken dikkate alıyor musunuz?



Şekil 4. Atölyelerdeki İSG Uyarı Levhalarına Öğrencilerin Verdiği Önem

Şekil 4'teki bulgular öğrencilerin %86'sının İSG uyarı levhalarını dikkate aldıklarını göstermektedir.

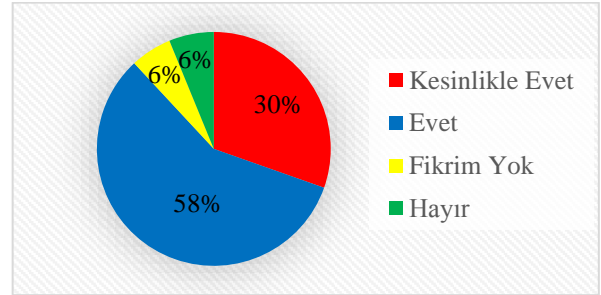
5. Atölye Öğretmenleriniz ders işlerken iş sağlığı ve güvenliği kurallarına uymanızla ilgili sizi uyarıyorlar mı?



Şekil 5. Atölye Öğretmenlerinin İSG Kurallarına Verdiği Önem

Şekil 5'teki bulgular öğretmenlerin İSG konularıyla ilgili hassas olduklarını ve öğrencileri derslerini işlerken güvenli çalışmalarını konusunda sürekli uyardıklarını göstermektedir. Uyarı alan öğrencilerin oranı %75 tir.

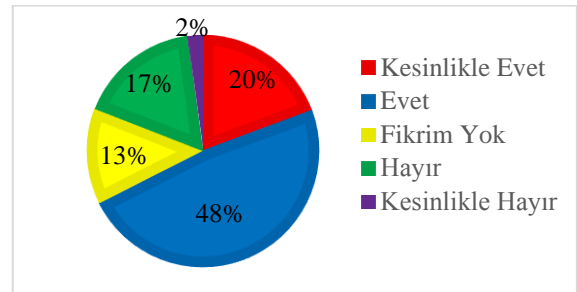
6. Öğrenci olarak atölyenizde iş güvenliği kurallarına gereken hassasiyeti gösteriyor musunuz?



Şekil 6. Öğrencilerin Atölyelerde Çalışırken İSG Kurallarına Verdiği Önem

Şekil 6'ya göre öğrencilerin %88 i İSG kurallarına uyduğu görülmektedir. Ayrıca olumsuz cevap verenlerin sayısı %12 iken ankette kesinlikle hayır seçeneği hiç tercih edilmemiştir.

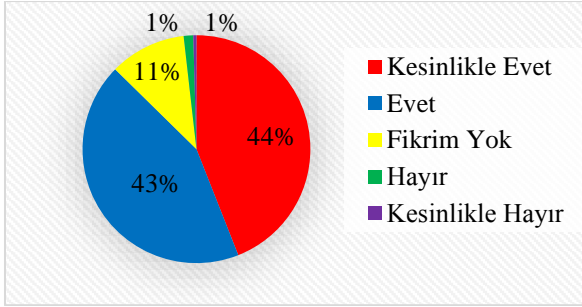
7. Öğretmenleriniz Meslek derslerinde İş sağlığı ve güvenliği konuları üzerinde duruyorlar mı?



Şekil 7. Meslek Derslerinde İSG Konularının Öğretmenler Tarafından İşlenişi

Şekil 7'ye göre öğrencilerin %68'i derslerinde İSG konularının öğretildiğini söylemektedir. % 32'lik kısma ulaşmak içinde İSG eğitimlerine devam edilmesi gerekmektedir.

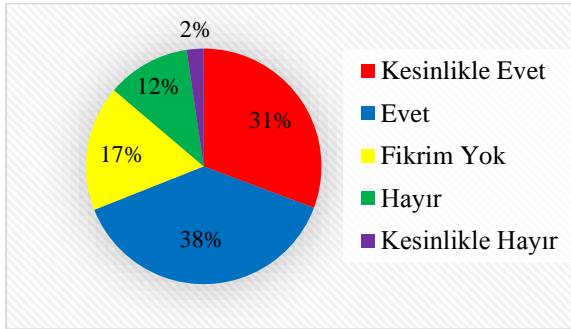
8. Atölye derslerine giren öğretmenlerinin iş sağlığı ve güvenliği konusunda yeterli bilgiye sahip olduğunu düşünüyor musunuz?



Şekil 8. Öğrenciler Açısından İSG Konuları Hakkındaki Öğretmen Yeterlilikleri

Şekil 8'e göre öğrencilerin %87'si atölye öğretmenlerinin İSG bilgilerinin yeterli olduğunu düşünmektedir.

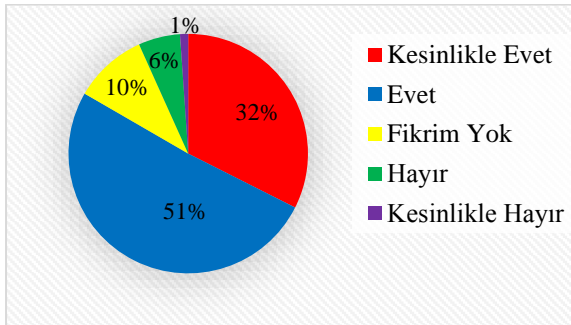
9. Okulunuzda İş sağlığı ve güvenliği ile ilgili ayrı bir ders olmasını ister misiniz?



Şekil 9. İSG Konularının Ayrı Bir Ders Olarak İşlenmesi

Şekil 9'daki bulgulara göre öğrencilerin %69'u iş sağlığı ve güvenliğinin ayrı bir ders olarak işlenmesini istemektedir.

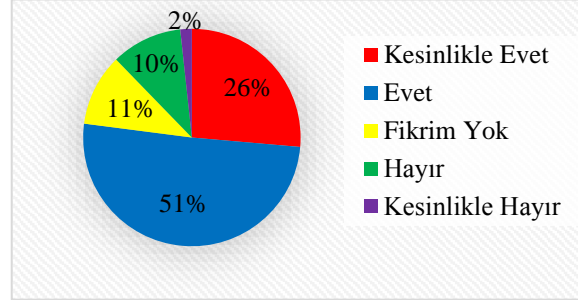
10. Atölyelerde cihazların kullanımı ve çalışma prensibini anlatan yazılı uyarı levhalar var mıdır?



Şekil 10. Atölyelerde Kullanılan Makinaların Çalışma Prensibinin Levhalarla Gösterilmesi

Şekil 10'daki bulgular okulun atölyelerinde makine ve cihazların kullanma talimatları ve çalışma prensiplerinin yazılı olduğu levhaların üzerlerine asılı olduğunu göstermektedir.

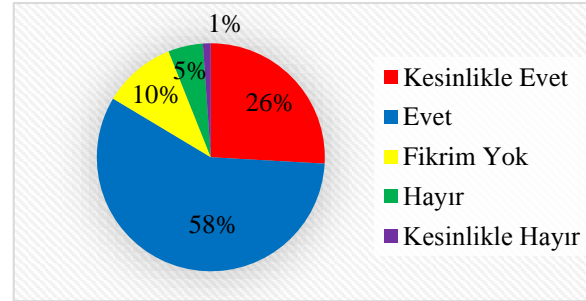
11. Atölyelerdeki çalışmalarda kişisel koruyucu ve donanımları (KKD) kullanıyor musunuz?



Şekil 11. Öğrencilerin Atölyelerde Çalışırken KKD Kullanım Durumu

Şekil 11'deki bulgular öğrencilerin %77'sinin atölye derslerinde KKD kullandıklarını göstermektedir. %23 ü ise kullanmadığını söylemektedir. Bu öğrencilere dikkat edilip atölyede KKD kullanmalarını sağlanmalıdır.

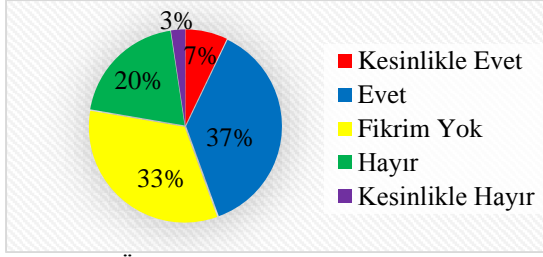
12. Okuduğunuz alanda hangi iş kazaları meydana gelir biliyor musunuz?



Şekil 12. Öğrencilerin Eğitim Aldıkları Alanlarla İlgili Meydana Gelen İş Kazaları Hakkındaki Farkındalıkları

Şekil 12'deki bulgular öğrencilerin büyük bir oranının %84'ünün mesleklerinde yaşanan kazaları bildiğini göstermektedir.

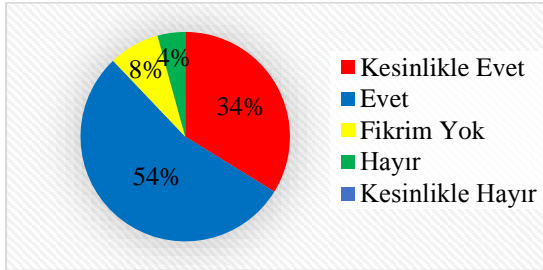
13. Okuduğunuz alanla ilgili meslek hastalıklarının neler olduğunu biliyor musunuz?



Şekil 13. Öğrencilerin Eğitim Aldıkları Alanlarla İlgili Meydana Gelen Meslek Hastalıkları Hakkındaki Farkındalıkları

Şekil 13'teki bulgular öğrencilerin %56 sınıf meslekleriyle ilgili meslek hastalıklarını bilmediklerini göstermektedir.

14. Mesleğiniz icabı kullanacağınız cihazlarla ilgili tehlikeler ve riskler hakkında bilgilendiriliyor musunuz?

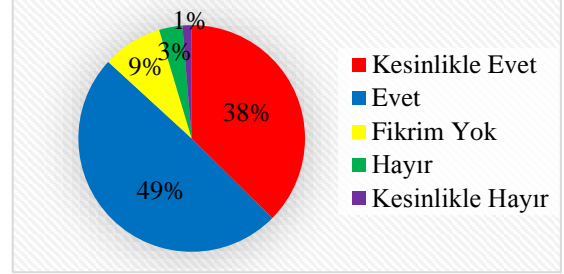


Şekil 14. Öğrencilerin Meslekleri İcabı Kullanacakları Cihazlardan Kaynaklanan Tehlike ve Riskler Hakkında Kendilerine Yapılan Bilgilendirme

Puan Aralığı = (En yüksek değer – En düşük değer)/5
 =(5-1)/5 = 0,80
 Ağırlıklı ortalamaların değerlendirme aralığı yandaki gibi bulunmuştur:

Şekil 14'e göre öğrencilerin %88 i meslekleriyle ilgili cihazları tanıdıkları ve bu cihazlardan kaynaklanan tehlike ve riskler hakkında onlara bilgi verildiği görülmektedir.

15. Atölyelerde kullandığınız cihazların tehlikeleri hakkında bilgilendirildiniz mi?



Şekil 15. Atölyelerde Kullanılan Cihazların Tehlikeleri Hakkında Öğrencilere Yapılan Bilgilendirme

Şekil 15'e göre öğrencilerin %87'si atölyelerde kullandıkları cihazlardan kaynaklı risklerin farkında olduğunu söylemektedir.

Ölçek için her bir maddeye verilen puan skorları 1 ile 5 arasında değişmektedir. Aralıkların eşit olduğu varsayılmış ve ağırlıklı ortalama için puan aralığı katsayısı 0.8 olarak hesaplanmıştır.

1-1.80	: "Kesinlikle Hayır"
1.81-2.60	: "Hayır"
2.61-3.40	: "Fikrim Yok"
3.41-4.20	: "Evet"
4.21-5.00	: "Kesinlikle Evet"

Maddeler	Aritmetik Ortalama	Sonuç
1. 6331 sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği kanunu hakkında bilginiz var mı?	2,62963	Fikrim yok
2. İş sağlığı ve güvenliğinin iş hayatını etkilediğini düşünüyor musunuz?	4,282407	Kesinlikle Evet
3. Lise eğitiminiz boyunca işçi sağlığı ve güvenliği hakkında size bilgi verildi mi?	3,518519	Evet
4. Atölyelerde buluna İSG uyarı levhalarını çalışırken dikkate alıyor musunuz?	3,75	Evet
5. Atölye Öğretmenleriniz ders işlerken iş sağlığı ve güvenliği kurallarına uymazla ilgili sizi uyarıyorlar mı?	4,722222	Kesinlikle Evet

6. Öğrenci olarak atölyenizde iş güvenliği kurallarına gereken hassasiyeti gösteriyor musunuz?	3,893519	Evet
7. Öğretmenleriniz Meslek derslerinde İş sağlığı ve güvenliği konuları üzerinde duruyorlar mı?	3,226852	Fikrim Yok
8. Atölye dersleri öğretmenlerinin iş sağlığı ve güvenliği konusunda yeterli bilgiye sahip olduğunu düşünüyor musunuz?	4,101852	Evet
9. Okulunuzda İş sağlığı ve güvenliği ile ilgili ayrı bir ders olmasını ister misiniz?	3,388889	Fikrim Yok
10. Atölyelerde cihazların kullanımı ve çalışma prensibini anlatan yazılı uyarı levhalar var mıdır?	3,782407	Evet
11. Atölyelerdeki çalışmalarda kişisel koruyucu (KKD) ve donanımları kullanıyor musunuz?	3,509259	Evet
12. Okuduğunuz alanda hangi iş kazaları meydana gelir biliyor musunuz?	3,75463	Evet
13. Okuduğunuz alanla ilgili meslek hastalıklarının neler olduğunu biliyor musunuz?	2,925926	Fikrim Yok
14. Mesleğiniz icabı kullanacağınız cihazlarla ilgili tehlikeler ve riskler hakkında bilgilendiriliyor musunuz?	3,925926	Evet
15. Atölyelerde kullandığımız cihazların tehlikeleri hakkında bilgilendirildiniz mi?	3,898148	Evet
Genel ortalama:	3,687346	Evet

IV. SONUÇLAR

Yapılan bu çalışmada lise öğrencilerinin İSG hakkında bilgi sahibi oldukları ve İSG kurallarına riayet ettikleri görülmüştür. Öğrencilerin kişisel koruyucu ve donanım (KKD) kullandıkları, atölyelerinde bulunan uyarı ve makina kullanım talimatlarına uydukları görülmüştür. Atölye öğretmenlerinin İSG kurallarına hâkim oldukları ortaya çıkmış ve öğrencileri atölyede

çalışırken İSG kurallarına uymaları konusunda ısrarcı oldukları anlaşılmıştır. Yine okulda bulunan atölyelerde İSG uyarı levhaları ve makine çalışma levhaları bulunmakta ve öğrenciler tarafından dikkate alınmaktadır.

- Öğrencilerimize 6331 sayılı İSG kanununu iyi anlatılması gerekmektedir. Bunu için İş sağlığı ve güvenliği mevzuatının ayrı bir ders olarak okutulması daha etkili olacaktır.
- Öğrencilerimize meslekleriyle ilgili meslek hastalıklarının neler olduğu daha iyi anlatılmalıdır. Ayrıca bu hastalıklardan korunma yolları da öğretilmelidir.
- Atölyelerde öğrenciler tarafından kullanılacak kişisel koruyucu ve donanımların temini için okullara daha çok kaynak ayrılmalıdır.

- Teknolojideki ilerlemelerin takibi ve son teknoloji ile üretilen makinelerin okul atölyelerine kazandırılmaları öğrencilerin bu makinalardaki tehlike ve riskleri tanımalarında büyük önem arz etmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Ceren G., Yıldırım S. (2018). Çalışanların Kişisel Özelliklerinin İş Kazası ve Meslek Hastalıklarına Etkisi Üzerine Bir İnceleme. *Fırat Üniversitesi İİBF Uluslararası İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 2(1),53-72. Erişim adresi: <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/532212>
- [2] Çalışanların İş Sağlığı Ve Güvenliği Eğitimlerinin Usul ve Esasları Hakkında Yönetmelik.(2013,15 Mayıs), *Resmi Gazete* (Sayı: 28648). Erişim adresi: <https://kms.kaysis.gov.tr/Home/Goster/42267>
- [3] Makine Mühendisleri Odası.(2018). İş Sağlığı Ve Güvenliği Oda Raporu, (Yayın No: MMO/689). Erişim adresi: <https://www.tmmob.org.tr/sites/default/files/isgraporu2018.pdf>
- [4] Özgüler A., Kaya K., Kağızmanlı B., Altuğ M.,(2016), Mühendislik Fakültesi Öğrencilerinin

- İş Sağlığı ve Güvenliği Eğitimi Yeterliliği, *Eğitim ve Öğretim Araştırmaları Dergisi*, Haziran, 5, 75-86. Erişim Adresi: <http://www.jret.org>
- [5] Turan İ., Şimşek Ü., Aslan H., (2015), Eğitim Araştırmalarında Likert Ölçeği ve Likert-Tipi Soruların Kullanımı ve Analizi, *Sakarya Üniversitesi Eğitim Fakültesi Dergisi*, Aralık, (30), 186-203. Erişim adresi: <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/115904>
- [6] Aslanoğlu İ., (2016), *Sosyal Bilimlerde Metot ve Araştırma Teknikleri*, Gazi Kitap Evi, (1. Baskı, Ankara, Türkiye s.10). Erişim adresi: <http://www.kulamyo.cbu.edu.tr> > [db_images](#) > [site_212](#) > [file](#) > [arastek](#)

A Quantitative Study on the Earthquake Forecast Verification for the Northwestern Turkey

Kuzeybatı Türkiye için Deprem Tahminleri Doğrulama Çalışması

Hakan KARACA¹ 

¹Nigde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Mimarlık Bölümü 51100, Niğde, Türkiye

Abstract

Seismic events have a pattern of recurrence in magnitude, time and space. Considerable effort is being spent to identify seismic patterns and successfully predict future earthquakes by using the recognized patterns. As a result of these intensive efforts, a variety of methods has been proposed. As the knowledge and experience in the field accumulated in parallel to the variety of the methods proposed, it was deemed necessary to test the performance of some of the highlighted methods, especially considering the wide reception of methods utilizing SSS, PI and RI. The performance of these methods in forecasting the earthquakes has been selected for investigation.

The investigated area is the region bounded by 27⁰-32⁰E in longitudes and 39.8⁰-42⁰N in latitudes, well known for the North Anatolian Fault. The period of coverage has been selected such as to maximize the length with the minimum magnitude of completeness. As a result of such optimization, the period from 1973 to 2019 has been selected with minimum magnitude of completeness being determined as 3.8. In order to measure the relative performance of the methods, ROC analysis has been utilized. The method based on SSS has been adapted to the related ROC procedures, while the results of PI and RI methods are already suitable for the evaluation by ROC procedures.

After the analysis was completed, according to the ROC procedures, none of the methods were singled out in forecast performance. However, when the ratio of hits versus total alarms and the area covered by the alarms, PI method outperforms two other methods by its efficiency.

Keywords: Pattern informatics, relative intensity, earthquake forecast, Northern Anatolian Fault Zone

Öz

Sismik hareketler büyüklük, zaman ve oluşum yerleri bağlamında bir düzende oluşurlar. Bu hareketliliğin hangi düzende ve sırada olduğu belirlenerek geleceğe yönelik tahminlerin başarılı biçimde yapılabilmesi için önemli ölçüde çaba harcanmaktadır. Bu çabaların sonucu olarak, şu ana kadar birçok yöntem geliştirilmiştir. Geliştirilen yöntemlerin çeşitliliği bağlamında bilgi ve deneyim artışı süregelen ve özellikle çoğunlukla kabul gören yöntemlerden, düzleştirmeye dayalı yöntemler (spatially-smoothed seismicity), örüntü bilişim (pattern informatics) ve görelî yoğunluk (relative intensity) yöntemlerinin yeni verilerle denenmesi gerekli olmuştur. Bahsi geçen yöntemler bu çalışma kapsamında, deprem tahmin performansları açısından incelenmek üzere seçilmiştir.

27⁰-33⁰ boylam ve 39.8⁰-41⁰ enlemleri arasında kalan, Kuzey Anadolu Fay Hattı ile ünlenen bölgemiz, çalışma alanı olarak belirlenmiştir. Çalışma döneminin belirlenmesi için minimum deprem büyüklüğü ile tamlık ölçütlerini sağlayan en uzun dönem araştırılmıştır. Bu kapsamda yapılan analiz sonucuna göre, tamlık ölçütünü sağlayan en küçük deprem büyüklüğü 3.8 olarak bulunmuş, tamlık ölçütlerine uyan dönem ise 1973 ile 2019 yılları arasında kalan dönem olarak belirlenmiştir. Tahmin yöntemlerinin başarısı ise görelî işletim ölçütü (ROC) analizi kullanılarak değerlendirilmiştir. Düzleştirme yöntemi uygulamaları ROC veri girdisi formatına göre uyarlanmış olup, PI ve RI yöntemleri is halihazırda ROC girdilerine uygun olarak veri üretmekte olduğundan herhangi bir uyarlamaya gerek kalmamıştır. Çözümlenmeler ve ROC değerlendirmeleri sonucunda yöntemlerden hiçbirisi öne çıkmamış ancak, başarılı tahminlerin toplam tahminlere ve tahminlerin kapladıkları alanlara göre değerlendirmesi sonucunda PI yönteminin diğer iki yöntemle göre daha verimli bir yöntem olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Örüntü bilişim, görelî yoğunluk, deprem tahminleri, Kuzey Anadolu fay hattı

I. INTRODUCTION

Recently, earthquake forecasting has become a subject with wide reception in the academic community. As the input in the development of forecasting algorithms, generally the spatio-temporal patterns of the past seismic activity are investigated for a wide region or within identified clusters. Among the renowned forecast studies, the ones within the scope of Regional Earthquake Likelihood Models (RELM) (Werner et al., 2011; Schorlemmer et al., 2010.; Zechar et al., 2013; Helmstetter et al., 2006, 2007, 2014) and the studies using the Pattern Informatics (PI) (Tiampo et al. 2002; Rundle et al. 2002, 2003) and Relative Intensity (RI) methods (Holliday et al. 2005, 2006) are receiving high attention as highlights of the field of earthquake forecasting. RELM techniques are based on spatial smoothing algorithms which is based on the optimization of the smoothing algorithm to forecast future pattern of seismicity. PI quantifies change in seismicity rate whereas RI measures the long-term seismicity forecasting in the considered region. PI method is generally accompanied by also included RI forecast models as the reference model.

Among the three mentioned models, the SSS model is mostly derived from the RELM techniques which repeatedly were employed by the listed researchers above. For the purpose of the study, the mentioned techniques are modified so that the associated spatial smoothing algorithm could be transformed into an alarm based forecast. Similar to the RELM techniques, the determination of the smoothing parameters, the log-likelihood method of Kagan and Jackson (1994), is adapted which was later clearly laid out in Helmstetter et al. (2006, 2007). The modified PI method which was laid out by Nanjo (2006) is implemented, as the modified PI proved to be more robust in forecasting. The RI method in its original form is used as a reference model.

Indeed, mainstream ideas lie beneath the forecasting algorithms as being either precursory seismic activation, quiescence or both. All these forecasting algorithms have their roots in the basic idea that large earthquakes tend to occur close to the locations of smaller earthquake clusters (Werner et al., 2011). Hence, by using this assumption, earthquake catalogs, which are generally thought to be missing the large magnitude events due to time gaps between long return periods of large magnitude events and coverage period of the existing catalogs, can be exploited to predict the large magnitude events.

The main issue in comparison of the relative performances of the binary forecasts of PI and RI, and continuum forecast of SSS methods is that a binary

forecast specifies whether an event is to occur or not to occur in the interested region, whereas, a continuum forecast offers the likelihood of the event to occur in the interested region (Holliday et al., 2007). In order to compare the performance of the PI, RI and SSS methods, a common measure has to be introduced or adapted. Knowing that SSS methods also rely on the grid system and that the variation of the relative likelihood of event occurrences can be modeled within the grid based system, the likelihood values can be treated as binary forecasts. Only then it is convenient to adapt the Relative Operating Characteristics (ROC) diagram, which indeed is developed to test the binary forecasts. Indeed, it is one of the contributions of this study to evaluate the performance of SSS method in earthquake forecasting. Among the three forecast methods, only the performance of the PI and RI methods are generally tested by using ROC whereas testing of SSS method by ROC is not attempted though it is a quite simple procedure.

In fact, this study is built on the idea that the performance of the various seismic pattern modeling algorithms should be put to the test to identify the outstanding methods. Indeed, depending on the performance of the forecasts, not only it is possible to determine which algorithm performs better but also whether the smoothing algorithm performs better for the interested region. Indeed, the advantage of PI method which considers the past fluctuations of seismicity, over both RI and smoothing methods, is also put to the test by this study as well. The crucial attempt is also made to investigate whether the forecasting methods would had forecasted the devastating earthquakes of Izmit and Duzce that occurred on 17 August 1999 and 12 November 1999. According to the analyses, only Izmit earthquake had precursors that could give hints for a possible future event, whereas since there aren't any precursor events prior to the Duzce earthquake, all the forecasting methods missed the earthquake completely.

II. SEISMIC DATABASE

The area of interest is identified as one of the most tectonically active regions, including the North Anatolian Fault Zone (NAFZ) (Figure 1) which recently has generated Izmit ($M_w=7.4$) and Duzce earthquakes ($M_w=7.2$) that caused significant damage. As displayed in Figure 1, the activity is concentrated along northern branch of the NAFZ between the latitudes of 40.5°N and 41.0°N. There is also a substantial activity spread over the various locations, as seismic clusters and as sparsely distributed earthquakes at various locations which are not associated with any of the clusters.

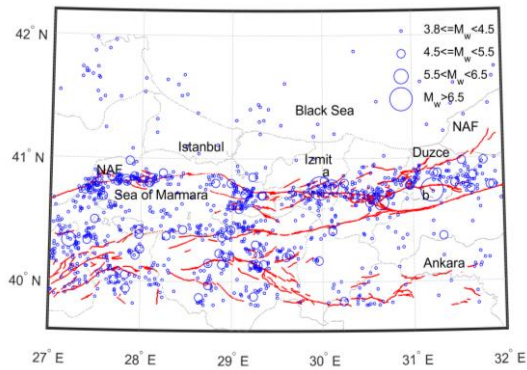


Figure 1. Seismicity around Sea of Marmara ($M_w \geq 3.8$, 1973-2019, Declustered, Depth < 20 km; a: Izmit Earthquake, b: Duzce Earthquake)

A catalog was created which is composed of KOERI^a data for the period between 1965 and 2019. The compiled catalog was subjected to homogenization for the purpose of unification of the magnitudes by using local magnitude conversion equations by Akkar et al., 2010, and it was de-clustered by using the time and space windows that were proposed in Gardner and Knopoff (1974). The proposed windows by the mentioned authors developed through a comparative study, which included the comparison of performances of commonly use de-clustering procedures with the Turkish data. Here, it should be mentioned that the de-clustering procedures are used to sort out the main earthquakes which are assumed to follow Poisson distribution. The de-clustering procedure removes the large fluctuations in temporal domain and enable us to identify the long term seismic activity rate. Before de-clustering, 2325 earthquake events were identified within the considered area, whereas, the number of events decreased to 1125 after de-clustering, which indicates the existence of a large number of foreshock and aftershock events in the catalogs.

The determination of the temporal variation of minimum magnitude of completeness (M_c) and the consequent evaluation of the catalog is a must for a reliable analysis. In this study, the method presented in Cao and Gao, 2002 is utilized to identify the values of M_c . As the product of the utilized method, the temporal variation of the M_c is displayed in Figure 2. Accordingly, the longest coverage period is selected as the period between the years of 1973 and 2019 as the M_c is identified as 3.8.

The temporal variation of the M_c is largely caused by the developments in the recording technology as well as the density and distribution of the instrumentation. Hence it is almost unavoidable to have a catalog with the different M_c values for any considered time interval. This variation, which should be a subject of

another study, could be attributed to many reasons including the nature of the data itself, the magnitude conversion equations and the data collection procedures with different magnitude scales at different periods (Öztürk (2011, 2017).

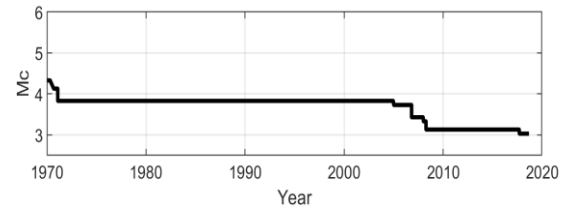


Figure 2. Temporal Variation of Magnitude of Completeness

III. METHOD

The PI method, which is based on monitoring the spatial and temporal variation of seismicity, doesn't provide the precise timing and location of a future seismic event, but provide a relative degree of possible future event locations for a predetermined time frame. Since the method is based on the idea to extrapolate the spatio-temporal pattern into a predetermined future time frame, it is a pre-requisite to identify the fluctuations of past seismic activity. The RI method, on the other hand is based on an approach based on the idea that large earthquakes tend to occur close to the locations of smaller earthquake clusters. Smoothing methods also is based on the same idea as in RI method with the only difference being the smoothing scheme. The detailed formulations are provided in the Appendix of this study.

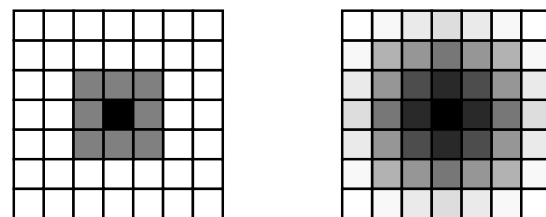


Figure 3. Moore Neighborhood (left) and Simple Smoothing Scheme for SSS Methods (right)

The PI and RI methods generally use a Moore neighborhood technique (Moore, 1962) (Figure 3) which is based on assignment of alarms only to the neighboring cells of the seismically active cell. The SSS method, the smoothing scheme is relatively complicated (Figure 3) to utilize especially for the grid system. As a matter of fact, the SSS methods is expected to enhance the forecast capability as the basic idea of the smoothing methodology is that future earthquakes are expected to occur within a close vicinity of past earthquakes. Moreover, smoothing helps compensate for limitation in the data, and it accounts for uncertainty in the location of the

epicenter. The formulations of PI, RI and smoothing method is provided in detail in the appendix.

Determination of the seismic activity patterns with respect to the space, magnitude, time and depth requires splitting the catalog into different bins. If there is sufficient number of events to detect a recognizable pattern, and an even distribution of events is provided which allow binning of the catalog into different magnitude bins, it is probable that the binning of the catalog with respect to time and magnitude might yield a meaningful pattern.

Table 1. Schemes for the Verification of the PI, RI and SSS methods

Scheme	Training Period	Learning Period	Forecast Period
	Coverage	Coverage	Coverage
1	1973-1999	1999-2009	2009-2019
2	1973-2004	2004-2014	2014-2019
3	1973-2009	2009-2014	2014-2019
4	1973-1989	1989-1999	1999-2000
5	1973-1990	1990-1995	1995-2000
6	1973-1985	1985-1995	1995-2000

In order to model the spatial distribution patterns in a manner best serving to the purpose of this study, the trade off between the loss of meaning by larger binning sizes and pointless division of the area into more grids than just sufficient should be handled delicately (Mohanty et al., 2016). For that reason, the size of the grids is subjectively selected in order to reflect the spatial density of the studied area. Accordingly, for the spatial binning, for all the forecast models, the area of interest is divided into spatial boxes sized 5 km x 5 km, which corresponds to $0.0625^{\circ} \times 0.050^{\circ}$ grids in longitudes and latitudes. For computational purposes the study area is extended by a single line of grid in both directions.

The temporal variation is measured through splitting the catalog into training and learning periods. In the selection of the periods, it is not forgotten that the time span for the training catalog should be long enough for the detection of the temporal seismic pattern, and the learning part should be sufficiently wide enough to verify the identified pattern.

For the verification of the forecast algorithms and testing the relative performances of each algorithm, six different schemes were developed as seen in Table 1. The first three schemes were planned in order to verify 5 and 10 year forecasts by using varying training and learning periods. The second group of schemes, scheme 4, 5 and 6 were developed to test the capabilities of the methods to forecast the earthquakes of Izmit ($M_w=7.6$, Aug,17) and Duzce ($M_w=7.2$, Nov,12) in 1999. For these schemes, 1-year, 5-year and 10-year forecasts were employed and the performances of the PI, RI and SSS methods in

forecasting the mentioned earthquakes were monitored. Indeed, the sole purpose of developing these schemes was to observe whether the forecasting algorithms would give an alarm before the devastating earthquake occurred.

In addition to the periods of coverage for each scheme, Table 1 also clarifies the distribution scheme of the events into the different periods also. Among all three schemes, scheme 1 has a more even distribution of events for the training, learning and forecast periods, whereas scheme 3, having the longest training period among the three, has more events lumped into the training period and a lesser number of events for both learning and forecast periods. It should also be mentioned that, the schemes are designed in such a way that, from scheme 1 to 3, the training periods becomes longer while the learning and forecast periods varies in terms of the length.

While the first three schemes are developed to test the forecast performance of the PI, RI and SSS methods, the sole purpose of developing schemes 4, 5 and 6 was to be able to observe whether these methods would have provided clues to the devastating earthquakes of Izmit,1999 and Duzce,1999. Hence the periods of training, learning and forecasting was determined accordingly. In scheme 4, a long term forecast was performed at the start of year 1999 whereas in schemes 5 and 6, a 5-year forecast was specifically planned to test the predictability of the devastating earthquakes of 1999.

After setting up the forecast schemes, the performance of the methods in forecasting is tested by ROC, selected from amongst the several techniques available for the evaluation of forecast (Kagan and Jackson, 1994, Molchan, 1997, Mason, 2003). ROC curves are extensively used in many fields that employ forecast systems and require assessment of the quality of the forecasts. The curve is constructed through the assessment of the quality of the forecast at predefined threshold levels.

In order to generate these curves, the hit rate, in other words, the ratio of the number of successfully forecasted events to the total observed events at the predefined threshold, is plotted against the false alarm rate - the rate of the number of events incorrectly forecasted to the total number spots where no earthquake is observed. The performance of each method for each forecast scheme is comparatively evaluated with respect to the slope of the hit rates and false alarm rates. The slopes at the initial threshold level (θ_i) and the average slope (θ_f) of the ROC curves are compared. The average slope is assumed to be the final values of hit rates divided by the final false alarm rates. Another tool used to evaluate the performance of the forecasts, is the contingency table. The table is generated to display the number of

successful forecasts or hits and failed forecasts or false alarms with respect to the observations. Misses, or number of occurred earthquakes that weren't forecasted and correct negatives or successfully forecasted silent spots where no earthquakes occurred are also listed in the table.

IV. RESULTS

As the first step towards the analysis, forecast maps for all the schemes were generated to locate the hotspots where the earthquakes are likely to occur within the forecast period. In order to give an example, for scheme 1, the hotspots can be seen in Figure 4, where earthquakes are likely to occur within the period

covering 2009-2019. According to the figure, the number of hotspots or alarms where the probable location of future earthquakes are significantly fewer with the PI method whereas RI and SSS methods forecast a considerably higher number of events. Secondly, the PI and RI values display a scattered pattern across the areas of interest, whereas the SSS method lumps the hotspots into more compact areas. Indeed, the lumping characteristic of the SSS method might be a limiting factor in the capacity to forecast future events. For example, in the areas north of Ankara, these methods do not foresee any future event, which PI and RI methods did successfully forecast.

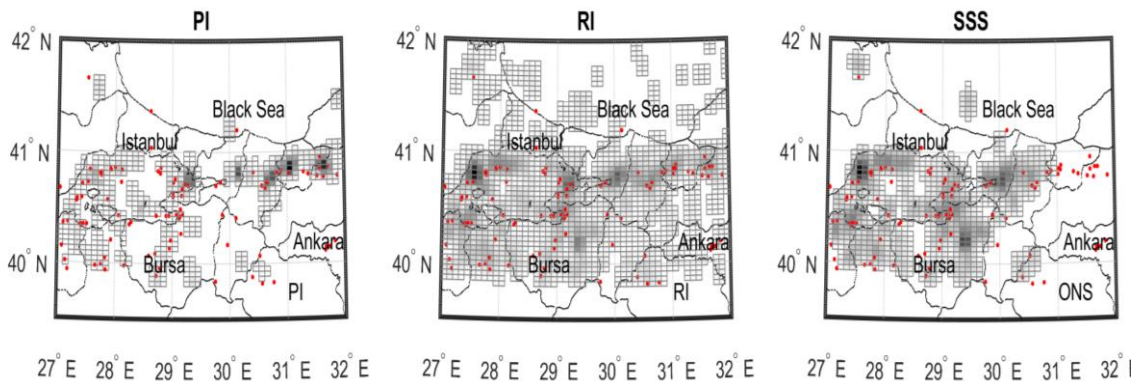


Figure 4. The Forecast Map for the Scheme 1 (The Probability of Earthquake Occurrence Increases with Color, Dots are Observed Earthquakes for 2009-2019 with $M_w \geq 3.8$)

Due to space requirements, other forecast maps couldn't be provided; however, the ROC curves are created as a measure of performance for each scheme. Figure 5 presents the curves, for the visual examination of the relative performances of each algorithm. In the figure the green line represents

random guess which can be used as reference to measure the relative success of the schemes. Interestingly, while all the curves are well above green line, none of the method can be singled out for outstanding performance except for the slightly better performance of PI method for schemes 1 to 3.

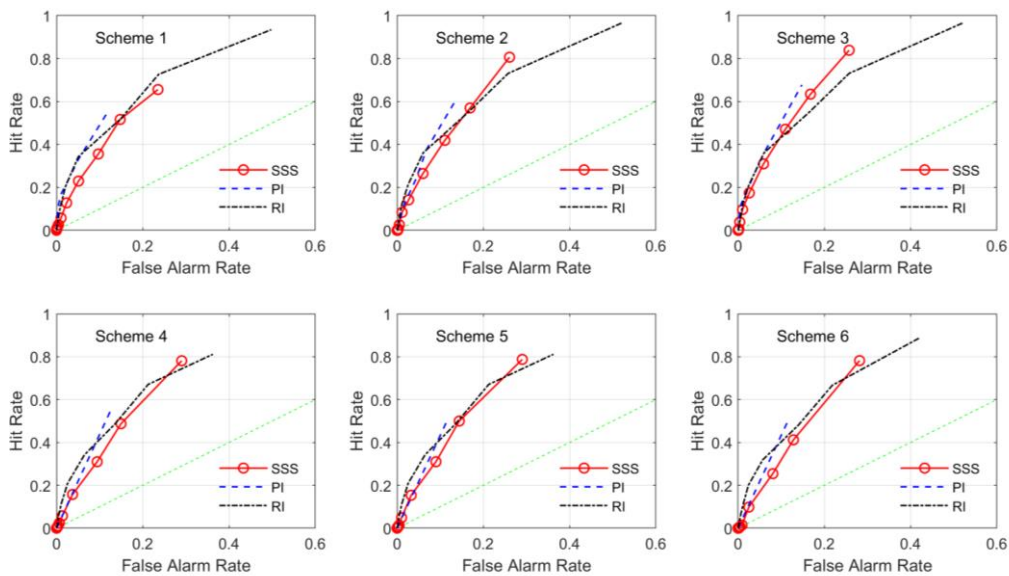


Figure 5. The Hit Rate versus False Alarm Rate for all the Schemes

After visual examination, it is easily concluded that the qualitative approach doesn't yield any reliable results, due to the absence of relatively outstanding performance. For quantitative analysis, only the initial and average slopes of these ROC curves in Table 2, offer information about the varying performances of the utilized methods. Especially higher initial and average slopes of PI curves deserve to be mentioned

for schemes 1 to 3, indicating better performance of this method in forecasting. For schemes 4 to 6, initially RI display superior performance then the rest whereas overall performance of PI exceeds the other two methods as well. The performance of SSS method generally lag behind both the PI and RI, except for the overall performance of RI method.

Table 2. Initial and Overall Slopes of ROC Curves of Schemes

Schemes	PI		RI		SSS		Length of Periods		
	Θ_i	Θ_f	Θ_i	Θ_f	Θ_i	Θ_f	Train	Learn	Test
1	46.46	4.68	30.98	1.88	30.98	2.79	26	10	10
2	24.97	4.44	15.61	1.85	5.00	3.09	31	10	5
3	24.97	4.57	15.61	1.85	7.34	3.26	36	5	5
4	4.38	4.37	11.77	2.24	3.90	2.69	16	10	1
5	4.32	4.31	11.77	2.24	7.79	2.71	17	5	5
6	11.87	4.70	16.44	2.11	3.18	2.77	12	10	5

Θ_i : Initial slope, Θ_f : Average slope

The contingency table is referred for better assessment of the results, as the table is populated with the analyses results for each method and scheme in a compact manner in Table 3. Before a detailed examination, it should be mentioned that, in order to compute the number of hits, false alarms, misses and correct negatives of the table, for PI and RI methods, positive values are accepted as hot spots where the earthquakes are forecasted to occur while the values above the average is accepted as hot spots for SSS method. At first the higher number of false alarms of PI gets the attention as both RI and SSS methods seems higher rate of hits and lesser false alarms, whereas if the number of hot spots are considered, RI method significantly outperform the others distantly followed by the SSS method. The correct negatives are the highest in all the schemes for all the methods except for the schemes 1 to 3 for RI method as the number of silent spots are outnumber the seismic events. It should be reminded that, the partitioning of

the area into a number of spatial bins is also a determining factor for the number of silent spots. Indeed, if the number of spatial bins is reduced, a higher forecast performance could be expected.

Considering that the training periods of the schemes of 1, 2 and 3 are intentionally increased in order to observe the influence of the length of the training period over the forecast, it is expected to have varying performances with respect to the changing period length. As a matter of fact, there is an emerging pattern from amongst the initial slopes of the curves, which paves the way to associate the relative performances of schemes 1, 2 and 3 with the subjective partitioning of the catalog. The initial slopes of the ROC curves of all the methods are considerably higher for scheme 1, with PI values being significantly higher than those of the others. Combining with the success trend of PI in schemes 2 and 3, the results indicate the clustering of events at different locations in time.

Table 3. Contingency Table for the Forecast Schemes*

Scheme	FORECASTED							
	Hit	Miss	PI		RI		SSS	
	False alarm	Correct Negative	Yes	No	Yes	No	Yes	No
1	OBSERVED	Yes	66	56	115	7	80	42
		No	440	3339	1933	1846	909	2870
2		Yes	19	12	30	1	25	6
		No	545	3325	2069	1801	1026	2844
3		Yes	20	11	30	1	25	6
		No	575	3295	2069	1081	1011	2859
4		Yes	31	26	52	5	43	15
		No	437	3407	1680	2164	1063	2780
5		Yes	80	85	66	99	128	38
		No	437	3299	192	3544	1069	2666
6	Yes	92	73	66	99	127	39	
	No	481	3255	192	3544	1045	2960	

* The number of boxes is 3901 for all the schemes as the considered area is extended single line of grid in both directions.

Regarding testing the performance of forecast algorithms on the prediction of the two big earthquakes of Izmit and Duzce in 1999, schemes 4, 5 and 6 were developed. Indeed, the schemes are specifically developed as one of the crucial objectives of the study is to verify the principle which states that large earthquakes tend to occur close to the locations of smaller earthquake clusters. Indeed, according to Figure 6 that is prepared to display the alarm map and

forecasted earthquakes of scheme 4, there is a significant seismicity accumulated within the close vicinity of Izmit earthquake, whereas the areas close to the epicenter of Duzce earthquake is relatively silent, a fact that has a direct influence on the outcome of the performance comparison.

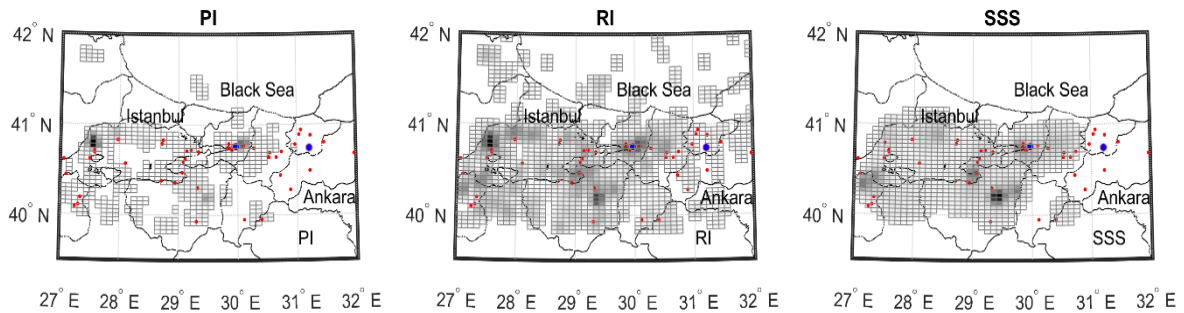


Figure 6. The Forecast Map for the Scheme 6 (The Probability of Earthquake Occurrence Increases with Color, Dots are Observed Earthquakes for 1999-2000 with $M_w \geq 3.8$)

Table 4. Varying Alarm Rates (The Area of Alarm/Total Area) at the Successful Forecast of for Izmit and Duzce Earthquakes

	Izmit			Duzce		
	PI	RI	SSS	PI	RI	SSS
Scheme 4	0.54	0.62	0.17	0.00		
Scheme 5	0.56	0.45	0.21			
Scheme 6	0.22	0.45	0.10			

As a matter of fact, the evaluation of the performances of each method is conducted as the ratio of the probability of occurrence of an earthquake at the epicenters of the Izmit and Duzce earthquakes, is computed with respect to the highest probability throughout the whole area. The computed ratio between the two probabilities is proportional to the alarm rate as well. In other words, as the ratio becomes higher, the alarm rate or the probability of occurrence is relatively higher as well. In light of above explanations, Table 4 was created for the evaluation of the relative performances of each method and scheme. Clearly, all of the methods and schemes completely miss the Duzce event, which indeed raise questions about the basic principle about the occurrences of large earthquake. For the Izmit earthquake, both PI and RI methods are more successful in scheme 4, whereas SSS method display lower performance in all the schemes.

the successful forecasts to the number of hot spots or alarms are plotted against the schemes and the percentage of area of alarms. As can be seen in Figure 7, except for the schemes 5 and 6, there is a wide gap between the performance of each method with respect to the mentioned measures. PI method outperforms the other two by a significant margin by lesser number of alarms and higher number of hits per alarm and per the percentage of area of alarms as well.

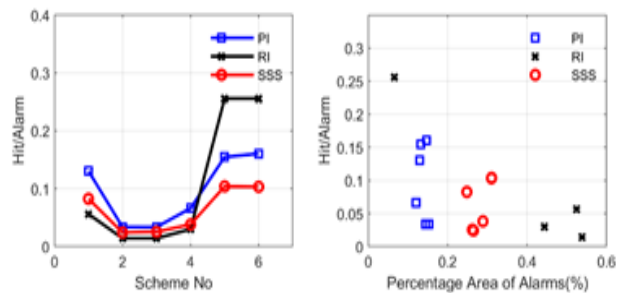


Figure 7. Forecast Success Rates of Each Methods with Respect to each Scheme and Forecast Area Ratio

V. DISCUSSION AND CONCLUSION

Knowing that the mentioned methods are developed based on the variety of seismicity patterns, it is expected that for an area with sufficient seismic information, a well-formulated forecast study would yield satisfactory results. In the case of a failure, either the formulation of the forecast scheme would be questioned or the non-conforming seismic patterns of the area of interest. However, if there are seismic patterns in the area of interest that don't comply with the assumptions of the forecast algorithms, then the approach should be modified. In this study, though

Another aspect of the forecast performance is also checked to account for the high variability of the number of hot spots or alarms of each method and scheme. So, the forecast success rate, or the ratio of

the forecast performance is well above random chance, it should be admitted that it yielded a moderate result.

One of the significant results that could be drawn from this study is that Indeed, as displayed in Figure 7, PI method performed slightly better by the common measures and by wide margin with respect to the measures introduced within this study. Having a pattern of seismicity as in the considered region, it could be projected that at some point in the future, it might be possible to forecast future events with more precision only with the condition that if the past fluctuations of seismicity could be better modeled. RI and SSS methods, having based on the idea that future events are more likely to occur within the close vicinity of the locations of past earthquakes regardless of its temporal distribution, are inherently incompetent. While according to the ROC curves and associated values derived from these curves, the performances of these methods are not very low compared to PI method. However, the number of hotspots or alarms are so high, both methods almost consider the whole interested area as hotspots in some cases, an inefficiency causing these methods to be less attractive.

Last but not least, the reason why SSS method performs better than RI while couldn't match with the performance of PI (Figure 7), lies within the fact that SSS lumps the alarms into more compact form in contrast to RI method which spread out the hotspots to entire area. The lumping of the seismicity assists in forecasting the future events as the identified seismic sources are expected to generate seismic events in the future, which holds true despite the fact that seismic clusters might be formed in different areas at different times as in the case of clustering around Düzce earthquake after 1999.

As a common sense, it is expected that, the capability to foresee future events would more likely to be increased as the accumulation of seismic events would offer more hints about the inherent seismic behavior of the area. Actually, the influence of the length of the catalog and subjective partitioning of the catalog into the periods of training, learning and forecasting is the sole determining factor in forecasting. Which scheme would perform better depends entirely on the seismic pattern of the interested region (Tiampo et al. 2007, Öztürk, 2014, Mohanty et al., 2016). Hence, it is always clever to evaluate the future seismicity of the interested area with several schemes and assess the performance and the forecast capability of the methods with several schemes as well (Tiampo and Shcherbakov, 2011, Zechar, 2010).

In the lights of above discussions, one might reach to the conclusion that the forecast algorithms, being

susceptible to the spatio-temporal pattern of seismicity, and binning methodology, might differ in forecast performance. Inherently, in a location with highly clustered seismicity and even temporal distribution, all the methods are expected to perform well, whereas, in a seismically active area with large variation in seismic pattern, PI method is expected to perform better (Holliday et al., 2005, Nanjo et al., 2006, Zechar and Jordan, 2008, Chen, 2011, Mohanty et al., 2016) as is the case with this study. Hence, it could be stated that seismicity has different sensitivities that different methods could identify better than the others. However, it should also be mentioned that accumulation of seismicity through time might eventually allow the determination of the best performing method in modeling the seismicity.

REFERENCES

Kitaplar

- [1] Mason, I.B. (2003). Binary events. In Forecast Verification, I. Jolliffe I. and D.B. Stephenson (ed)), Wiley, Chichester, England, s 37–76

Makaleler

- [1] Werner, M.J., Helmstetter, A., Jackson, D.D. ve Kagan, Y.Y. (2011). High-Resolution long-term and short-term earthquake forecasts for California, *Bull Seism Soc Am.*, 101(4), 1630–1648
- [2] Schorlemmer, D., Zechar, J.D., ve RELM Working Group. (2010) First results of the Regional Earthquake Likelihood Models experiment, *Pure Appl Geophys*, 167, 859-876
- [3] Zechar, J.D., Schorlemmer, D., Werner, M.J., Gerstenberger, M.C., Rhoades, D.A. ve Jordan, T.H. (2013). Regional Earthquake Likelihood Models I: First order results, *Bull Seism Soc Am.*, 103(2A), 787–798.
- [4] Helmstetter, A., Kagan, Y.Y. ve Jackson, D.D. (2006). Comparison of short-term and time-independent earthquake forecast models for Southern California, *Bull Seism Soc Am.*, 96(1), 90-106.
- [5] Helmstetter, A., Kagan, Y.Y. ve Jackson, D.D. (2007). High-Resolution time-independent grid-based forecast for $M \geq 5$ earthquakes In California, *Seismol Res Lett.*, 78(1), 78–86.
- [6] Helmstetter, A. ve Werner, J.M. (2014). Adaptive smoothing of seismicity in time, space and magnitude for time-dependent earthquake forecasts for California, *Bull Seism Soc Am.*, 104(2), 809-822.
- [7] Tiampo, K.F., Rundle, J.B., McGinnis, S., Gross, S.J. ve Klein, W. (2002). Mean field threshold systems and earthquakes: An application to earthquake fault systems. *Europhys. Lett.*, 60(3):481–487.
- [8] Rundle, J. B., Turcotte, D. L., Shcherbakov, R., Klein, W., ve Sammis, C. (2003). Statistical physics approach to understanding the multiscale

- dynamics of earthquake fault systems. *Rev. Geophys.*, 41(4),1019.
- [9] Holliday, J.R., Nanjo, K.Z., Tiampo, K.F., Rundle, J.B. ve Turcotte, D.L. (2005). Earthquake forecasting and its verification. *Nonlinear Processes Geophys.*, 12, 965–977.
- [10] Holliday, J.R., Rundle, J.B., Tiampo, K.F., Klein, W. ve Donnellan, A. (2006). Modification of the Pattern Informatics method for forecasting large earthquake events using complex eigenvectors. *Tectonophysics.* 413(1–2), 87–91.
- [11] Kagan, Y.Y. ve Jackson, D. (1994). Long-term probabilistic forecasting of earthquakes. *J Geophys Res.* 99(B7), 13685–13700.
- [12] Nanjo, K.Z., Holliday, J.R., Chen, C.C., Rundle, J.B. ve Turcotte, D.L. (2006). Application of a modified pattern informatics method to forecasting the locations of future large earthquakes in the central Japan, *Tectonophysics*, 424, 351-366.
- [13] Holliday, J.R., Chen, C.C., Tiampo, K.F., Rundle, J.B., Turcotte, D.L. ve Donnellan, A. (2007). A RELM earthquake forecast based on Pattern Informatics. *Seismol Res Lett.*, 78(1), 87–93.
- [14] Akkar, S., Çağnan, Z., Yenier, E., Erdogan, E., Sandikkaya, M.A. ve Gülkan, P. (2010). The recently compiled Turkish Strong-Motion Database: Preliminary investigation for seismological parameters, *J of Seismol.*, 14, 457-479.
- [15] Gardner, J. K., and L. Knopoff (1974), Is the sequence of earthquakes in Southern California, with aftershocks removed, Poissonian?, *Bull. Seis. Soc. Am.*, 64(5), 1363–1367
- [16] Cao, A. and Gao, S.S. (2002). Temporal variation of seismic b-values beneath northeastern Japan island arc. *Geophys Res Lett* 29:
- [17] Öztürk, S. (2011). Characteristics of seismic activity in the Western, Central and Eastern Parts of the North Anatolian Fault Zone, Turkey: Temporal and spatial analysis, *Acta Geophys.*, 59 (2), 209-238
- [18] Öztürk, S. (2017). Kuzey Anadolu Fay Zonu ve civarındaki güncel deprem aktivitesinin bölgesel ve zamana bağlı analizleri, *Yer Bilimleri*, 38(2), 193-228
- [19] Mohanty, W.K., Mohapatra, A.K., Verma, A.K., Tiampo, K.F. ve Kislak, K. (2016) Earthquake forecasting and its verification in Northeast India, *Geomat Nat Haz Risk.*, 7(1), 194-214
- [20] Molchan, G.M. (1997) Earthquake predictions as a decision-making problem, *Pure Appl. Geophys.*, 149, 233–247
- [21] Tiampo, K.F., Rundle, J.B., Klein, W., Holliday, J., Martins, J.S. ve Ferguson, C.D. (2007). Ergodicity in natural earthquake fault networks. *Phys Rev E.*, 75,066107
- [22] Öztürk, S. (2014). Türkiye'nin Batı Anadolu bölgesi için deprem istatistiği ve olası güçlü depremlerin orta vadede bölgesel olarak tahmini üzerine bir çalışma, *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 4(1), 75-93
- [23] Tiampo, K.F. ve Shcherbakov, R. (2011). Seismicity-based earthquake forecasting techniques: Ten years of progress, *Tectonophysics.*, 522–523, 89–121
- [24] Zechar, J.D. (2010) Evaluating earthquake predictions and earthquake forecasts: a guide for students and new researchers, *Community Online Resource for Statistical Seismicity Analysis*, doi:10.5078/corssa-77337879.
- [25] Zechar, J.D. ve Jordan, T.H. (2008) Testing alarm-based earthquake predictions, *Geophys. J. Int.*, 172, 715–724
- [26] Chen, C.C. (2011). Characteristics of long-term regional seismicity before the 2008 Wen-Chuan, China, earthquake using pattern informatics and genetic algorithms, *Nat Hazards Earth Sys.*, 11, 1003–1009.

Bildiriler

- [1] Moore, E.F. (1962). Machine models of self reproduction, *Proceedings of the Fourteenth symposium on Applied Mathematics*; Providence, Richmond, USA, American Mathematical Society.
- [2] Rundle, J.B., Tiampo, K.F., Klein, W., Martins, J.S.S. (2002). Self-organization in leaky threshold systems: The influence of nearmean field dynamics and its implications for earthquakes, neurobiology, and forecasting. *Proceedings of National Academy of Sciences, U. S. A.*, 99:2514–2521: Suppl. 1.

Internet

- [1] Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü, KOERI (2017) <http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/zeqdb/>, Last Date of Access: January 2019.

APPENDIX

A.1. PI Method

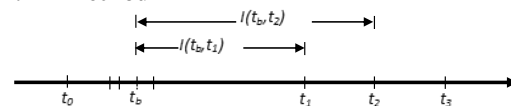


Figure A1 Temporal Range Selection of Earthquake Time Series.

Initially, temporal windows were established to be able to monitor the variation of seismicity. A reference temporal window between t_0 and t_1 and a change temporal window between t_1 and t_2 were established to be able to detect the variation of seismic intensity in time, which led to the necessary information to forecast earthquakes in the forecast window between t_2 and t_3 . The introduction of base time, t_b , which moves from t_0 to t_1 , is required to

monitor the seismic variation, which indeed is the difference between the normalized seismic density over the time from t_b to t_2 , $I(t_b, t_2)$ and from t_b to t_1 , $I(t_b, t_1)$.

$$\hat{I}_i(t_b, t) = \frac{I_i(t_b, t) - \langle I_i(t_b, t) \rangle}{\sigma(t_b, t)} \quad (A1)$$

Here $I_i(t_b, t)$ is the seismic density, $\langle I_i(t_b, t) \rangle$, the mean of the seismic density over all the grids, and the spatial standard deviation, $\sigma(t_b, t)$. The variation of seismicity is computed by subtracting the normalized seismic densities

$$\Delta I_i(t_b, t_1, t_2) = \hat{I}_i(t_b, t_2) - \hat{I}_i(t_b, t_1) \quad (A2)$$

The seismic variation is averaged over the time, from t_0 to t_1 , where the base time varies,

$$\overline{\Delta I_i(t_0, t_1, t_2)} = \frac{1}{t_b - t_1} \sum_{t_b=t_0}^{t_1} \Delta I_i(t_b, t_1, t_2) \quad (A3)$$

Then the probability of a future earthquake for grid i is computed by

$$P_i(t_0, t_1, t_2) = \overline{\Delta I_i(t_0, t_1, t_2)}^2 \quad (A4)$$

Finally, the spatial mean of the probability is subtracted from the earthquake occurrence probability, in order to identify the hotspots where future seismic events are forecasted to occur.

$$\Delta P_i(t_0, t_1, t_2) = P_i(t_0, t_1, t_2) - \langle P_i(t_0, t_1, t_2) \rangle \quad (A5)$$

A.2. RI Method

The number of earthquakes for each grid box is counted and the values are normalized by using the maximum of the values of all the grid boxes.

$$n_i(t_0, t_2) = \sum_{t=t_0}^{t_2} n_i(t) \quad (A6)$$

$$\log(LL) = \mu_{\min} + \sum_i \log p(\lambda(i_x, i_y), \omega(i_x, i_y)) = \mu_{\min} + \sum_i [-\lambda_i + \omega_i \log(\lambda_i) - \log(\omega_i!)] \quad (A9)$$

Above μ_{\min} is the positive constant parameter to account for seismic noise, p is the occurrence probability. λ_i is the normalized spatial density, and w_i is the number of observed events in the testing catalog for each cell i .

Here $n_i(t_0, t_2)$ is the number of earthquakes in each grid box between t_0 and t_2 . It is a basic assumption that the probability of future earthquakes in each grid box is proportional to the number of earthquakes in each box. The normalization of these values with a maximum number of earthquake counts in the grid boxes just enhances the computation efforts while not influencing the final outcome.

A.3. Smoothing Method

The widely accepted and utilized smoothing algorithm is the simple Gaussian isotropic kernel:

$$K_d(r) = c(D) \exp\left(-\frac{|r|^2}{2D^2}\right) \quad (A7)$$

Here D is the smoothing distance and $c(D)$ is the normalizing factor. A reverse bell-like shape centered at the earthquake epicenter smears the seismicity rates to the neighboring grids, where the r value is assigned to be the exact distance of a single grid box.

The optimum values for the smoothing distances were introduced when encountering a loss of meaning, blurring of the seismic activity rates or fragmentation of seismic density due to the large or small kernel bandwidths (Stock and Smith, 2002). The method based on the optimum neighbor number (ONS) in setting the smoothing distance doesn't follow the same suit with PI and RI methods, and for each earthquake the optimum kernel bandwidth varies depending on the varying influences of earthquakes in the determination of the right pattern of occurrences. Here the optimum kernel bandwidth is determined by the method based on Kagan and Knopoff (1977). The information gain per each earthquake for varying distances with respect to the reference model is measured by

$$G = \exp\left(\frac{\log(LL) - \log(LL_r)}{N_i}\right) \quad (A8)$$

Here LL is the log-likelihood of the tested model, and LL_r is the log-likelihood of the reference model. N_i is the total number of earthquakes in the testing catalog. The log-likelihood of a model is determined by the summation of the terms of the Poisson distribution:

Tekerlekiçi Fırçasız Doğru Akım Motorlarının Sıcaklık Dağılımlarının Toplu Parametrelili Devre Modeli Şeması ile İncelenmesi

Temperature Distribution Analysis of In-Wheel Brushless Direct Current Motor Based on
Lumped Circuit Schemes

Ali Sinan ÇABUK¹ 

¹*İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, Maslak-İstanbul*

Öz

Elektrik motorlarında sıcaklık etkisi motorun çalışma karakteristiğini etkileyen önemli parametrelerden birisidir. Isıl etkinin iyi bir şekilde incelenmesi gerekmektedir. Araştırmacılar tarafından yapılacak elektrik motoru tasarımlarının buna uygun olarak düzenlenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, tekerlekiçi fırçasız doğru akım (FDA) motorunun sıcaklık dağılımlarının incelenmesi toplu parametrelili devre modeli şeması yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Isıl etkiler elektrik motorlarının performanslarını değiştirir. Bununla birlikte kalıcı mıknatısların manyetik özelliklerini geri dönmeksizin yitirmelerine neden olurlar. Motor sargılarındaki yalıtkanları bozunuma uğrattırır. Bütün bu etmenlerden dolayı ısıl etkinin imalatın önce iyi incelenmesi gereken bir parametre olduğu unutulmamalıdır. Bu çalışmada hafif elektrikli araçlarda daha çok kullanılmakta olan 3000 W çıkış gücü değerine sahip, bara gerilimi 150V, hızı 1000 d/dk olan 20 kutup-24 oluklu yapı tercih edilmiştir. Isıl analiz sonuçları ile prototip üzerindeki ısıl test sonucu değerleri incelenip, motorun tasarımında kullanılan parçalar üzerindeki etkileri irdelenmiş, benzetim çalışması sonuçlarının gerçekçi sonuçlarla örtüşerek imalat öncesi tercih edilebilir bir yaklaşım olduğu yargısına ulaşılmıştır.

Anahtar kelimeler: Tekerlekiçi Fırçasız Doğru Akım Motoru, Isıl Etki, Lumped-Devre Modeli, Verim, Sargı Yapısı, Hafif Elektrikli Araçlar

Abstract

Thermal effect is one of the most important parameters for electric motors. The thermal effect should be analyzed in detail by the researcher. Hence the design of electric motor can be fixed with thermal analysis. In this study, the temperature distributions of the in-wheel brushless direct current (BLDC) motor were examined using the Lumped-circuit model scheme. Thermal effects change the performance of electric motors. However, they cause the permanent magnet to lose its magnetic properties without recurrence. They decompose insulators in motor windings. Because of all these factors, it should be noted that the thermal effect is a parameter that needs to be examined well before manufacturing. For this paper, 20-poles/24-slots with fixed power of 3000 W bus voltage and motor speed as 150 V and 1000 rpm has been preferred which is used more in light electric vehicles. Thermal analysis results and prototype thermal test were examined, the effects on the parts used in motor design were investigated, the results of the simulation studies overlap with the experimental test results reached a judgment that can be preferred before manufacturing.

Keywords: In-Wheel BLDC Motor, Thermal Effect, Lumped Circuit Schemes, Efficiency, Winding Shape, Light Electric Vehicle

I. GİRİŞ

Elektrik motorlarında ısıl etki performansı etkileyen önemli parametrelerden birisidir. Bu etkinin doğru bir şekilde incelenip yapılacak elektrik motoru tasarımlarının buna uygun olarak düzenlenmesi gerekmektedir. Isıl etkisi iyi anlaşılmayan ve buna önlem alınmayan bir elektrik makinesinin kayıplarının artarak verimsiz çalışma durumuna geçmesi gözlemlenir. Bununla birlikte sabit mıknatısların curie sıcaklığı değerini aşarak mıknatısların geri dönmeksizin bozunuma uğramasına, sargıların aşırı ısınmasına ve motor sargı yalıtkanlarının zarar görmesine neden olur [1-5].

Elektrik motorları sürekli olarak nominal güç değerlerinde çalışabilirler. Nominal güç ifadesine teorik olarak bakıldığında; sürekli çalışma sırasında verebilecekleri en büyük mil gücü olarak tanımlanabilir. Motor çıkış gücüne etki edecek miline bağlı yüklerin nominal güç değerinden daha fazla yüklenmesi durumunda da sürekli çalışma durumunda olmamak koşuluyla çalışabilir. Kısa süreli nominal güç değerinden yüksek olan bu çalışma halinin motor üzerine birçok zararlı etkileri vardır, fakat belirtilen çalışma süresi uzun olmadığı durumlarda bu etkiler kabul edilebilir düzeydedir. Aşırı yük durumunda çalışma süresi uzatılırsa ısınmadan dolayı motor sargılarının yanmasına, sargı yalıtkanlarının zarar görmesine ve sabit mıknatısların özelliklerini kalıcı olarak yitirmesine neden olabilir [6]. Bu yüzden aşırı yük durumunun ve dolayısıyla motor sıcaklık değerlerinin kontrol altında tutulması önemlidir. Gerek motorların ısı performans testleri ile ilgili standartlar gerekse çeşitli yüklerde çalıştırmak için gerekli olan performans ölçütleri ve çalışma koşullarıyla ilgili standartlar döner elektrik makinalarının performans değerlendirmeleri uluslararası standartı olan IEC 600034-1 standartı altında yer almaktadır.

Elektrik motoru sargı olukları içinde kullanılan yalıtkan malzemelerin özellikleri yalıtım sınıflarıyla birlikte belirlenir. Her yalıtkan malzeme sınıfının dayanabileceği sıcaklık değerleri vardır. Bunlar Tablo 1'de verilmiştir [7,8].

Tablo 1. Motor sargı yalıtım sınıfları ve çalışma sıcaklıkları [9,10]

Yalıtım Sınıfı	Maksimum Sargı Sıcaklığı [°C]	Maksimum Isınma [°C]	Isınma Toleransı [°C]
A	105	60	5
E	120	75	5
B	130	80	10
F	155	105	10
H	180	125	15

Tekerlekliçi fırçasız doğru akım (FDA) motorlarında sıcaklıktan en fazla etkilenen kısımlar sabit mıknatıslar ve sargılardır. Motor sıcaklığının izin verilen maksimum sıcaklık değerlerini aşması durumunda motor sargılarının motor gövdesiyle olan yalıtımını sağlayan yalıtkan malzeme özelliğini kaybedip zarar görebilir ve motor sargı iletkenleri arasında kısa devrelere neden olabilir [9]. Bununla birlikte mıknatıslar enerji yoğunluğu değerlerini sıcaklık artışıyla kaybetmeye başlarlar. Curie sıcaklığına erişen sabit mıknatıslar geri dönmeksizin manyetik özelliklerini kaybederler. Bu nedenlerden dolayı motor çalışma sıcaklığının imalattan önce bilinmesi önem arzeder.

Bu çalışmada hafif elektrikli araçlarda kullanılan tekerlekliçi FDA motorunun Motor cad yazılımı ile benzetim çalışmasıyla ısı analizi yapılmıştır. Motor-Cad yazılımı gözlü elektrik devre yapısına benzeyen göz ağları kullanarak ısı problemleri ortaya çıkarır ve sürekli rejim halindeki ısı devre modelini tanımlar. Yazılım motor parçaları düğümleri arasında bağlı ısı dirençleri ve ısı kaynaklarını içerir. Ayrıca geçici hal benzetiminde ise gövdenin ısı dirençlerini ilave eder. Bu sırada gövdenin zamana bağlı değişim gösteren iç enerjisini hesaplamalara ilave etmek için ısı kapasitanslar kullanılmaktadır. Burada belirtilen ısı dirençler iletim ve yayılım olarak Eşitlik 1 ve 2 deki gibi hesaplanır.

$$R_{iletim} = \frac{l}{\lambda A} \quad (1)$$

$$R_{yayınım} = \frac{l}{\alpha A} \quad (2)$$

Burada l düğüm noktaları arası uzaklık, λ ısı iletkenlik katsayısı, A kesit alanı ve α ise ısı yayılım katsayısıdır.

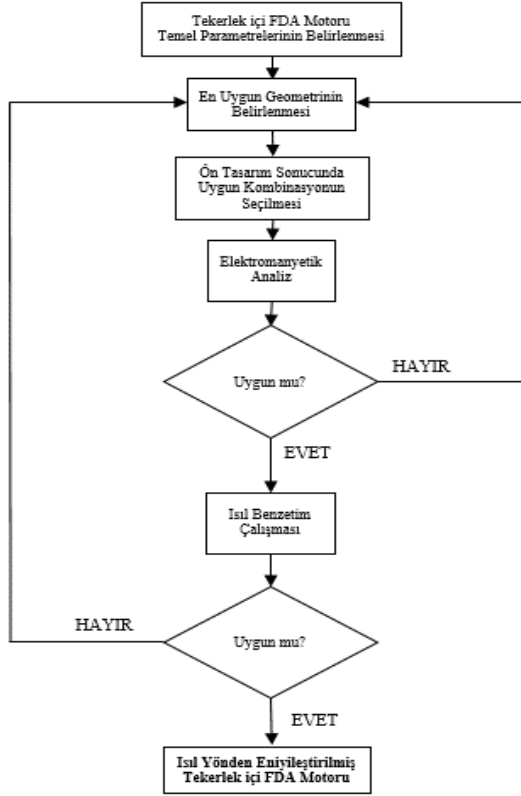
Isıl kapasitanslar ise;

$$C = V \rho c \quad (3)$$

Burada V hacim, ρ yoğunluk ve c malzemenin ısı kapasitesidir [10].

Yapılan benzetim çalışması için hafif elektrikli araçlarda (güneş arabası, motorsiklet vb.) daha çok tercih edilen yapı olan 3000W çıkış gücü değerine sahip, bara gerilimi 150V, hızı 1000 d/dk olan 20 kutup-24 oluklu yapı tercih edilmiştir. Bu yapı yazarların önceki çalışmalarında performans olarak iyi sonuçlar vermiş olan bir tasarım yapısına sahiptir [6].

Bu çalışma boyunca yapılan işlem adımları ve süreç Şekil 1'de verilmiştir.



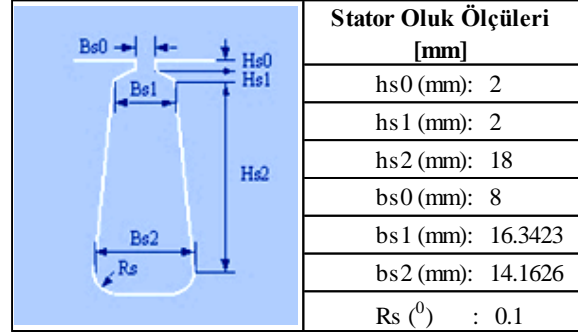
Şekil 1. Tekerlek içi FDA motorunun ısıl analiz süreci

II. TEKERLEK İÇİ FDA MOTORU ISIL BENZETİM ÇALIŞMASI

Güneş arabası yarışlarında kullanılan hafif elektrikli araç tekerlek yapısı ölçüsü baz alınarak Tablo 2 ve Şekil 2’de verilen 6mm. kalınlığında ve mıknatıs kucaklama değeri (embrace) 0,8 olan sabit mıknatıslı tekerlek içi FDA motoru parametreleri ile tasarım çalışmasına başlanmıştır. Tasarımın ön benzetim çalışması sonlu elemanlar yöntemi (SEY) ile gerçekleştirilmiş ve elektromanyetik analizleri yapılmıştır.

Tablo 2. Tekerlek içi FDA motoru tasarım çalışması başlangıç değerleri

Parametreler	Değer
Güç [W]	3000
Gerilim [V]	150
Anma Hızı [d/dk]	1000
Min Araç Ağırlığı [kg]	370
Tekerlek Çapı [mm]	320
Stator Malzemesi	M27_26G
Sabit Mıknatıs	NdFeB38



Şekil 2. Tekerlek içi FDA motoru stator oluk ölçüleri

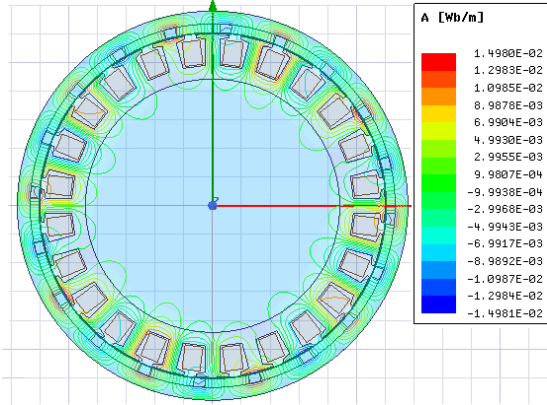
Tablo 2’de verilen veriler çerçevesinde oluşturulan yapının elektromanyetik analizleri motorun parametrelerinin belirlenmesi anlamında önem taşımaktadır. Bu parametrelerle oluşturulan motor sarım sayısı 32 olan yarım kalıp-konsantrik sargılıdır. Sargılarda çapı 2,174 mm, yalıtkan vernik kalınlığı 0,3 mm olan iletkenler kullanılmıştır. Oluk doluluk oranı imalatta sıkıntı olmaması için %60 değerini aşmayacak şekilde belirlenmiştir. Elektromanyetik alan analizleri sonucunda stator da doyma noktalarının oluşup oluşmadığı, manyetik alan kuvvet çizgilerinin düzgün dağılımda olup olmadığının kontrolü yapılabilmektedir. Yapılan benzetim çalışmasında bütün faz sargılarının direnci, öz ve karşılıklı endüktansı eşit ve sabit, manyetik devre doyumları göz ardı edilmiş ve çalışma ortam sıcaklığı değeri 90°C olarak belirlenmiştir. Yapılan bu benzetim Eşitlik 4 poisson denklemi ve Eşitlik 5’de verilen 2 boyutlu poisson denklemi yardımıyla hesaplamalarını yapmaktadır.

$$\nabla^2 V = -\frac{\rho_f}{\epsilon} \quad (4)$$

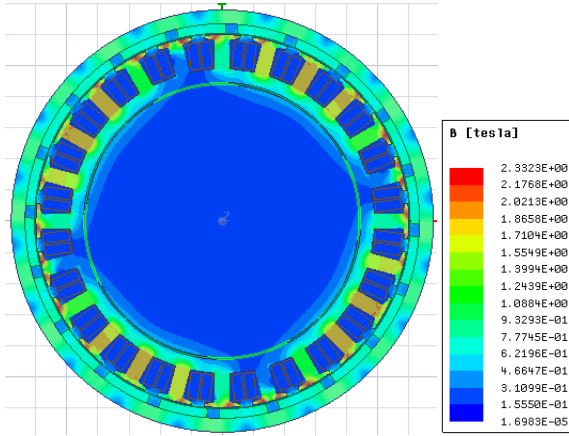
$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} = -\frac{\rho_f}{\epsilon} \quad (5)$$

Burada ρ_f yük yoğunluğu, ϵ ortamın dielektrik katsayısıdır.

Yukarıda parametreleri belirtilen tekerlek içi FDA motorunun manyetik alan analizleri sonucunda bulunacak manyetik akı çizgilerinin motor geometrisi üzerindeki dağılımı ve manyetik akı yoğunluğunun nerelerde doyuma gittiği veya gitmediğinin anlaşılması için önem taşımaktadır. Şekil 3 ve 4’de benzetim sonucunda elde edilen manyetik akı çizgisi ve manyetik akı yoğunluğu dağılımları görülmektedir.



Şekil 3. Tekerlekiçi FDA motoru iki boyutlu manyetik akı çizgileri dağılımı



Şekil 4. Tekerlekiçi FDA motoru iki boyutlu manyetik akı yoğunluğu dağılımı

Şekil 3’de verilen tekerlekiçi FDA motorunun manyetik akı çizgilerinin gerek rotor sırt demirinde gerekse stator dişleri üzerinde düzgün bir dağılım gösterdiği görülmektedir. Şekil 4’deki manyetik akı yoğunluğu dağılımına bakıldığında, stator diş uçlarında sınır akı yoğunluğu değerleri olan 2T’ya yaklaşıldığı ama motorun genelinde sınır değerlerin aşılmadığı anlaşılmaktadır.

Benzetim çalışması sonucunda moment değerinin 30Nm. civarında olduğu, dış momentinin 0,58 Nm., endüvi akım yoğunluğunun 4,36 A/mm², ortalama giriş akımı 22,3A olduğu görülmektedir.

Benzetim sonuçlarından tekerlekiçi FDA motorunun hedeflenen moment değerine stator ve rotor üzerinde doyum bölgeleri olmadan erişebileceği yargısına varılmıştır. Tekerlekiçi FDA motorları için önemli konulardan birisi doğal soğutmaya alan yetersizliğinden dolayı doğal soğutmaya uygun olup olmadığının incelenmesidir. Yapılan manyetik alan analizlerinden endüvi akım yoğunluğunun doğal soğutmaya uygun olan 4-6

A/mm² sınır değeri içerisinde olduğu görülmektedir. Manyetik alan analizi sonuçları belirtilen motorun termal analizinin doğal soğutma olacak şekilde tasarıma başlanması gerektiğini belirtmektedir. Benzetim sonuçlarından ortaya çıkartılan yapının gerçek çalışma sırasında oluşacak olan ısının motor bileşenlerine ve benzetim sonuçlarına etkisini gözlemleyebilmek için Motor-Cad yazılımı ile gerçek ısıl analizi yapılmıştır. Bu yazılım ısıl analizi yapabilmek için manyetik alan analizine ait olan benzetim dosyasından motorun geometrik ölçüleri, elektriksel parametreleri, manyetik alan analizi sonuçları gibi birçok veriyi kendisi almaktadır. Bu yazılımın temelini oluşturan toplu parametrelili devre modeli, elektrik motorlarının sıcaklık etkilerinin ortaya çıkartılmasında kullanılan benzer yazılımlar toplu öğeli olan toplu parametrelili devre modelini temel olarak analizlerini gerçekleştirirler. Sıcaklık dağılımlarının yer aldığı bu devre modelinde, motor gövdesi içerisinde bulunan ve birbirleriyle etkileşim halindeki parçalar arasında taşınım, iletim ve ışınım yöntemiyle ısıl etkiler aktarılmaktadır ve bunların ısıl değerleri analitik yöntemlerle hesaplanmaktadır. Tekerlekiçi FDA motorunu oluşturan parçaların sıcaklıklarını yaklaşık olarak değerlendirmek için geliştirilen analitik ısıl devre modeli stator ve rotor için ısıl hesaplama Eşitlik 6 ve 7’deki gibidir.

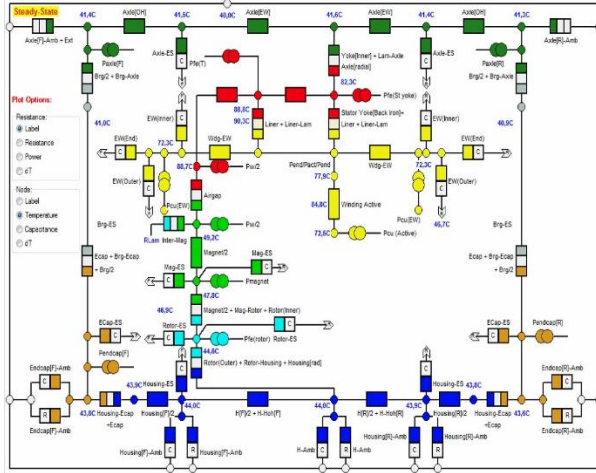
$$\Delta\Theta_R = [p_R (I/I_N)^2 \Delta\Theta_{NR}] [1 - e^{-t/\tau_{1R}}] + [(1 - p_R) (I/I_N)^2 \Delta\Theta_{NR}] [1 - e^{-t/\tau_{2R}}] \quad (6)$$

$$\Delta\Theta_S = [p_S (I/I_N)^2 \Delta\Theta_{NS}] [1 - e^{-t/\tau_{1S}}] + [(1 - p_S) (I/I_N)^2 \Delta\Theta_{NS}] [1 - e^{-t/\tau_{2S}}] \quad (7)$$

Burada $\Delta\Theta_R$ rotordaki ısıl artışı, $\Delta\Theta_S$ stator ısıl artışı, p_R ve p_S rotor ve stator sargılarının kısa süre sabiti için ağırlık faktörünü, I_N nominal akımını, I faz akımını, τ_{1R} ve τ_{1S} rotor ve stator sargılarının anlık soğuma- ısınma zaman sabitini, $\Delta\Theta_{NR}$ ve $\Delta\Theta_{NS}$ rotor ve statorun nominal yük ve akım durumundaki ısıl artışını, t zamanı, τ_{2R} ve τ_{2S} rotor ve statorun gövdesindeki soğuma- ısınma zaman sabitini verir [11-14].

Bu çalışmada üzerinde incelemeler yapılan prototipin benzetim çalışması sonucunda iletken akım yoğunluğu değerinin 4 ile 5 A/mm² arasında değişim gösterdiği görülmüştür. Bundan dolayı, oluşturduğumuz yapının ilave bir soğutucu ünitesine gereksinim duymadığı ve doğal hava soğutmanın yeterli olacağı düşünülmüştür. Zaten tekerlekiçi motor yapıları doğal soğutma dışında soğutulmaları mekanik kısıtlamalar yüzünden oldukça zordur. Isıl analiz çalışmaları motorun doğal soğutma sistemine sahip olmalı yargısına göre devam

ettirilmiştir. Tablo 2'deki değerlere sahip tekerleğiçi FDA motor tasarımı Motor-Cad yazılımıyla analiz edilmesinden ortaya çıkan toplu parametrelili ısı devre modeli Şekil 5'de gösterildiği gibidir.



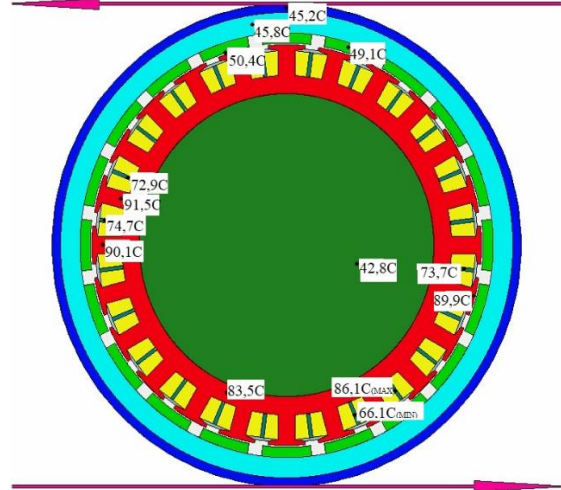
Şekil 5. Tekerleğiçi FDAM toplu parametrelili ısı dağılım devre modeli

Bu devre modelinde kahverengi renk motor gövdesini, koyu mavi renk motor kasasını, turkuaz renk rotor sırt demirini, kırmızı renk stator sacını, açık yeşil renk sürekli mıknatısı, sarı renk stator sargısını, koyu yeşil renk mili ve gri renk ise rulmanı ifade etmektedir. Ayrıca bu ısı devre modelinde kullanılan sembollerin anlamları ise Tablo 3'de verildiği gibidir.

Tablo 3. Tekerleğiçi FDAM ısı dağılım devre modeli parametreleri

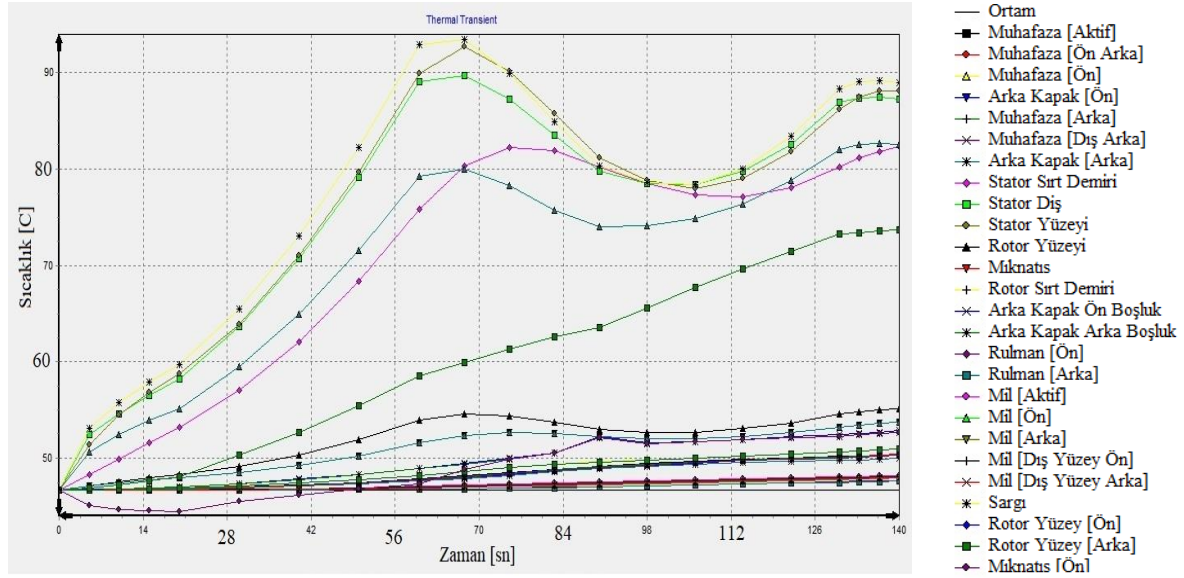
Parametre	Açıklama
	Termal direnç
	Ara yüz direnci
	Isı yayılımı direnci
	Radyasyon direnci
	Güç kaybu
	Düğüm noktası
	Sıcaklık farkı
	Güç akışı

Şekil 5'de verilen toplu parametrelili ısı dağılım devre modeli üzerinde ısı düğüm noktaları ve bunlara bağlı olan motor parçalarının sıcaklık değerleri verilmiştir. Bu ısı devre modelinin daha iyi anlaşılabilmesi için Şekil 6'daki ısı dağılımların incelenmesi gerekebilir. Tekerleğiçi FDA motorun radyal geometrisi üzerindeki ısı dağılımlar ise Şekil 6'da verildiği gibidir.



Şekil 6. Tekerleğiçi FDAM radyal geometri ısı dağılımı

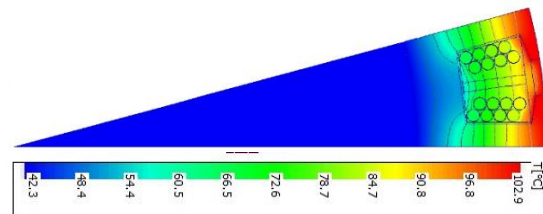
Gerek ısı dağılım devre modelinde gerekse radyal geometri ısı dağılımında görüldüğü üzere motorun genelinde ortalama değerler olarak 92°C'nin geçilmediği, sadece manyetik akının yoğun olduğu oluk dışlarında 91,5°C değerine ulaştığı görülmektedir. Benzetim modelinde kullanılan prototipin rotoru için seçilen NdFeB38 sürekli mıknatısının çalışma sıcaklığı 80°C dir. Isıl dağılım devre modelindeki sabit mıknatıs üzerindeki çalışma ortalama sıcaklığının 49,1°C civarında ve yüzey sıcaklığının 77,61°C olduğu görülmektedir. Bu sıcaklık değeri NdFeB_38H mıknatısının manyetik bozulmasının olabileceği sıcaklık değerinin (Curie sıcaklığı) altında olduğu gözlenmiştir. Böylece bu sonuçlar elektromanyetik alan analizi ile ulaşılan; tekerleğiçi FDAM geometrisindeki elektriksel büyüklüklerin ilave bir soğutma sistemine ihtiyaç duymayacağı yargısını desteklemektedir.



Şekil 7. Tekerleğiçi FDA motoru zamansal ısı dağılımı

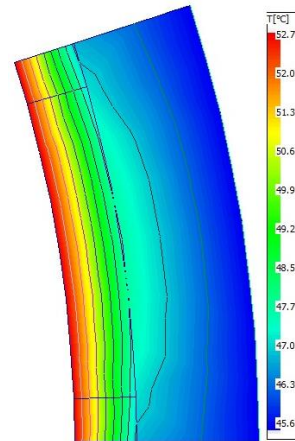
Şekil 7’deki zamansal ısı dağılımına baktığımızda sargılar ve stator yüzeyindeki sıcaklık değerlerinin ani bir artış gösterip 84. saniyeden sonra rejime girdiği ve ulaştığı sıcaklık değeri etrafında salınımlar yaptığı görülmüştür. Rotor yüzeyi ve sabit mıknatısların ise zaman değişimiyle doğru orantılı bir biçimde yüksek artışlar oluşmadığı anlaşılmıştır.

Şekil 8’de tekerleğiçi FDAM stator kesiti ısı dağılımında görüldüğü üzere stator oluk tabanında sıcaklığın düşük seviyelerde olduğunu, olukların hava aralığına yakın bölgelerinde ise sıcaklık değerlerinin daha yüksek değerlere çıktığı belirtilebilir. Ortalama sargı sıcaklığının 121,04°C olduğu için stator olukları içindeki B sınıfı bir izolasyon malzemesi tercih edilmesi gerektiği sonucu çıkartılabilir. Bu izolasyon sınıfına sahip malzeme ile motorda, özellikle aşırı akıma neden olacak zor şartlarla karşılaşılacağı ve aşırı yüklenmelerin olacağı uygulamalarda yüksek ısıl dayanıklılık sağlanmış olur.



Şekil 8. Tekerleğiçi FDAM stator kesiti ısı dağılımı

Sırt demirine ait Şekil 9’daki rotor kesiti ısı dağılımında sabit mıknatısların hava aralığına yakın olan bölgelerinde yüksek sıcaklıklara çıkarken, sırt demirine yakın olan bölgelerde daha düşük sıcaklık değerlerine eriştiği görülmektedir. Bu değer mıknatıs yüzeyi üzerinde 77,61°C civarında olduğu ve seçilmiş olan NdFeB38 mıknatısın curie sıcaklığı olan 80°C’ye erişmediği görülmektedir.



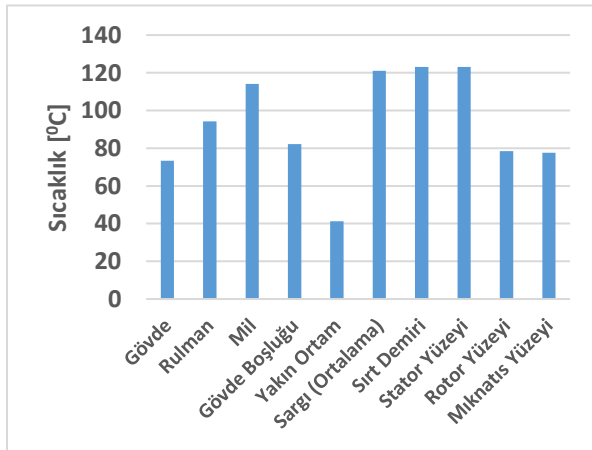
Şekil 9. Tekerleğiçi FDAM rotor kesiti ısı dağılımı

Şekil 5,6,7, 8 ve 9’dan edindiğimiz bütün ısı analiz verilerini Tablo 4’de görebiliriz.

Tablo 4. Termal analiz sonucu

Sıcaklık Ölçüm Bölgesi	Sıcaklık [°C]
Gövde	73,31
Rulman	94,24
Mil	114,05
Gövde Boşluğu	82,12
Yakın Ortam	41,2
Sargı (Ortalama)	121,04
Sırt Demiri	123,07
Stator Yüzeyi	123,09
Rotor Yüzeyi	78,51
Mıknatıs Yüzeyi	77,61

Tablo 4’de görüldüğü üzere sargı sıcaklıkları yüksek değerlerde olmasına rağmen kabul edilebilir sınır değerleri içindedir. Gerek stator sacları ve rotor çeliği, gerekse sabit mıknatıslar gerçek ısıl analiz sonuçlarında belirtilen sıcaklık değerleri içinde çalışabilecek malzemelerdir. Burada özellikle sabit mıknatısların maruz kaldığı sıcaklık değeri manyetik bozuluma uğramaması bakımından önem arz etmektedir. Şekil 10’da Motor-Cad yazılımı ile yapılan benzetim sonuçlarının karşılaştırılması verilmiştir. Buna göre tekerlekiçi FDA motorunda en çok ısınan yer stator yüzeyi ve sargılar, en az ısınma olan parça ise motor gövdesi ve mıknatıs yüzeyleridir.

**Şekil 10.** Tekerlekiçi FDAM ısıl dağılım

III. ISINMA TESTİ

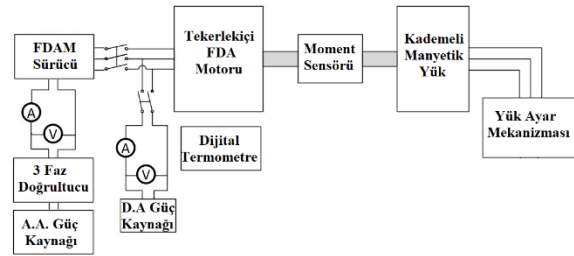
Yüksek sıcaklık durumu FDAM için sabit mıknatısların bozulmasına ve yalıtkan malzemelerin özelliklerini yitirmesinin yanı sıra bakır kayıplarının artmasına neden olur. Sargılardaki bu ısı motorun

rotor, stator, gövde ve miline yayılır ve motorun gövde içi sıcaklığını yükseltir. Bundan dolayı, motorun gövde ısısını dikkate alarak sargı sıcaklığının değeri hakkında yargıya varmak doğru olmaz. Motor sıcaklığının ölçümünde iki yöntem kullanılmaktadır; termik elemanlarla ölçüm yöntemi ve direnç artışı yöntemi. Bu çalışmada yapılan ısınma deneyinde yaygın olarak tercih edilen direnç artış yöntemi kullanılmıştır. Direnç artış yöntemi, iletkenin sıcaklık değişimine bağlı olarak direnç değerinin değişmesi durumuna dayanır. IEC 60034-1 standardına göre yapılan ısınma deneyinde motorun milinin nominal güç ile yüklenmesi ve önceden belirlenmiş aralıklarda sargı direnç değerinin ölçülmesi ile gerçekleştirilmiştir. Isınma deneyi başlangıç koşulu olarak motor iç sıcaklığının ortam sıcaklığı olarak kabul edilmiştir. Sargılarda kullanılan iletkenler için direnç artış karakteristiği dikkate alınarak, ilk ve son direnç oranlarından sargıların ulaştığı ortalama sıcaklık değeri Eşitlik 8 ile belirlenir [12,13].

$$\frac{\theta_2 + k}{\theta_1 + k} = \frac{R_2}{R_1} \quad (8)$$

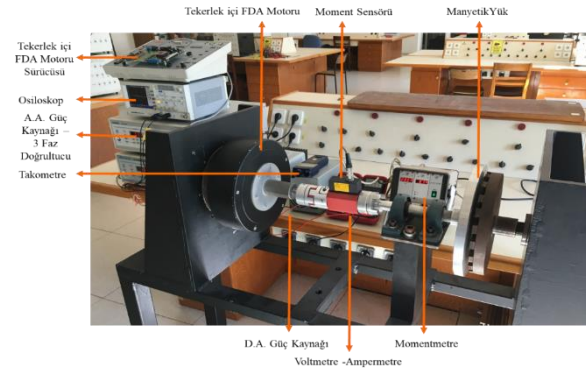
Burada θ_1 soğuk durumdaki sargı sıcaklığı, θ_2 ısınma deneyi sonundaki sargı sıcaklığı, R_1 θ_1 sıcaklığındaki sargı direnci, R_2 ısınma deneyi sonundaki sargı direnci, k 0°C’deki malzemenin sıcaklık katsayısıdır.

Isınma testinin amacı motorun sargı sıcaklığının çeşitli yük durumları için çıkarılması ve Motor-Cad yazılımı ile benzetim çalışmasıyla ulaşılan sonuçlarla uyumunun karşılaştırılmasıdır. Isıl test sırasında, motorun performans deneyi sonucuyla erişilmiş en iyi çalışma noktasındaki yük ile yüklenmiş ve motorun sürekli çalışma sıcaklığında olup olmadığının denetimi yapılmıştır. Isınma deneyinde Şekil 11’deki bağlantılar kurulup gerekli ölçümler yapılmıştır. Bu deneyde motorun en iyi performans deneyi sonucundaki gücü sabit tutulmuş ve ortam sıcaklığı 25,8°C olduğu durumda gerçekleştirilmiştir.

**Şekil 11.** Tekerlekiçi FDAM ısınma deneyi bağlantı şeması

Şekil 12’de görülen test düzeneğinde motoru yüklemek için manyetik fren kullanılmıştır. Test esnasında manyetik yük değeri artırılarak gerekli ölçümler yapılmıştır. 3 saat süren ısınma deneyinde motor

milinin güç değeri sabit tutularak yolverilen motorun direnç değeri ölçümleri ilk 1 saat boyunca 15'er dakika aralıklarla, daha sonraki 2 saatlik dilim için yarım saatlik aralıklarla yapılmıştır. Yapılan direnç artış yöntemi ölçümleri hassas olması ve deneyin bütünlüğünün bozulmaması için birkaç saniye içerisinde yapılmıştır. Isınma deneyi boyunca motor sargı sıcaklığı değerleri Tablo 5'de verilmiştir. Deney sonucunda motor sargı sıcaklığı 118,213°C'ye ulaşmıştır. Isınma deneyi sırasında alınan değerlere bağlı olarak motor ısınma eğrisi Şekil 13'deki gibi oluşturulmuştur.

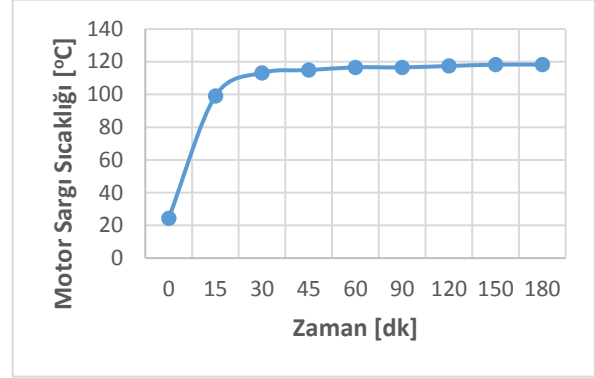


Şekil 12. Tekerleğiçli FDAM ısınma deneyi düzeni

Tablo 5 ve Şekil 13'de görüldüğü gibi ısınma deneyi ile elde edilen motor sargı sıcaklığının Motor-Cad yazılımı ile elde edilen sonuç ile örtüştüğü görülmektedir. Isınma testi ile elde edilen motor sargı sıcaklığı ortalama değeri 114,26546°C'dir. Motor-Cad benzetim çalışması ile elde edilen ortalama motor sargı sıcaklığı ise 121,04 °C'dir. Buradan gerçek ölçüm ile benzetim çalışması ile elde edilen sıcaklık değeri arasında % 5,6 fark olduğu görülmektedir.

Tablo 5. Isınma deneyi sonuçları

Ölçüm Süresi [dk]	Ortam Sıcaklığı [°C]	Sargı Direnci (2R) [Ohm]	Motor Sargı Sıcaklığı [°C]	D.A. Kaynak Gerilimi [V]	D.A. Kaynak Akımı [A]
0	25,8	0,312	24,3	3	9,615
15	25,9	0,402	99,0981	3	7,463
30	26	0,419	113,227	3	7,156
45	26	0,421	114,889	3	7,126
60	26,7	0,423	116,551	3	7,092
90	26,1	0,423	116,551	3	7,092
120	26	0,424	117,382	3	7,076
150	26,4	0,425	118,213	3	7,059
180	25,7	0,425	118,213	3	7,059



Şekil 13. Motor ısınma grafiği

Deney sonucu elde edilen sıcaklık değeri göz önüne alınıp toplu parametrelili devre modeliyle birlikte sabit miktatsların bozunuma uğramadan çalışma gösterecekleri yargısına erişilebilir. Bunun yanında sargı yalıtımında kullanılan malzemenin B yalıtım sınıfına sahip olması gerekliliğide doğrulanmış olmaktadır.

IV. SONUÇLAR

Isıl etki tekerleğiçli FDAM performansına etki eden önemli parametrelerden birisidir. Bu tip yapıda olan elektrik motorlarında gövde içi soğutma için kullanılan pervane, gövde kanatçıkları gibi yapılar mekanik sınırlama nedeniyle tasarımlarda kullanılamamaktadır. Bu nedenden dolayı tekerleğiçli FDA motorlarda sıcaklık etkisinin iyi incelenmesi gerekmektedir. Motor parçaları üzerindeki ısıl etkileri imalatan önce gerekli şekilde incelenmeden üretimi yapılan tekerleğiçli FDA motorun kayıplarının öngörülme bir şekilde arttığı ve verimsiz bir çalışma durumu sergiler. Bununla birlikte yüksek ısıl etkiler tekerleğiçli FDAM sürekli miktatslarının curie sıcaklığı değerini geçtiğinde geri dönülmeksizin manyetik özelliklerini kaybetmesine, sargıların aşırı ısınıp zarar görmesine ve sargı yalıtkan malzemelerinin zarar görmesine neden olur. Belirtilen bütün bu olumsuzluklar motorun arıza durumuna geçmesini kolaylaştırıp motorun çalışma ömrü azaltacaktır. Belirtilen bu olumsuzluklar, imalat sonucunda elde edilecek ısıl etkilerin önceden bilinmesine yardımcı olacak gerçekçi yaklaşımların önemini daha iyi anlamayı sağlamaktadır. Yardımcı mekanik soğutmaya imkan vermeyen tekerleğiçli FDA motorlarda sıcaklığın tasarım sırasında belirlenmesi, hem tasarımın değişmesine hemde malzeme seçimlerine etki etmektedir.

Bu çalışma, tekerleğiçli FDAM toplu parametrelili devre modeli benzetim çalışması sonuçlarının prototipi imal edilmiş olan motorun üzerinde yapılan ısıl test sonuçlarını doğrular nitelikte olduğunu göstermektedir. Tablo 4'de verilen benzetim sonuçlarıyla Tablo 5'de verilen ısıl test sonuçları birbirini destekler niteliktedir. Motor sargı sıcaklığı,

benzetim çalışması sonucu ile motorun gerçek çalışma koşulunda ölçülen değeriyle arasında % 5,6'lık bir hata payı olduğu görülmektedir. Bu fark değerinin kabul edilebilir sınırlar içerisinde olduğu söylenebilir. Isıl analiz sonuçlarının toplu olarak incelendiği Tablo 4 ve 5'de de görüldüğü üzere sargı sıcaklıkları yüksek değerlerde olmasına rağmen kabul edilebilir sınırlar içerisinde. Böylece gerekli çıkış gücünü elde ederken sargıların ısı etkilerinden zarar görmeyecek olduğu yargısına erişilmektedir. Şekil 6,8 ve 9'de verilen ısı dağılımlarında sıcaklık etkilerinin miknatıs yüzeyi ve stator dişleri üzerinde yoğunlaştığı görülmektedir. Çalışmada belirlenen gerek stator sacları ve rotor çeliği, gerekse sabit miknatıslar toplu parametrelili devre modeli ısı analiz sonuçlarında belirtilen sıcaklık değerleri içinde çalışabilecek malzemeler olduğu anlaşılmıştır.

Toplu parametrelili devre modeli ile eriştiğimiz sonuçlar doğrultusunda karar verilen malzemelerin gerçek ısı analiz testinden geçtiği ve bu malzemelerin gerçek özelliklerinin bu sıcaklık derecelerinde bozunuma uğrayarak değişmeyeceği yargısına ulaşılmıştır. Bununla birlikte bu malzemelerin tekerlekiçi FDAM imalatında kullanılabilir olduğu sonucuna erişilmiştir. Bu çalışmanın sonuçlarından biriside toplu parametrelili devre modeli sonuçlarının gerçekçi bir yaklaşım olduğunu ispatlar niteliktedir. Ayrıca elektrik araçlarda tercih edilen tekerlekiçi FDAM üzerine incelemeler yapan araştırmacılar ve imalatçılar için bu model sonuçlarını kullanarak gerçekçi yaklaşımlarda bulunabileceklerini göstermektedir. Motor-CAD yazılımının, tasarımcıya bu karmaşık ve önemli tasarım alanında gerçekçi sonuçlara ulaşmasına yardımcı olacak bir araç olduğu söylenebilir.

%100 yerli otomobil yapılması hız verilmiş ve gerek devlet tarafından gerekse özel sektör tarafından desteklenerek gelecekte ülkemize yön verecek olan bu aracın elektrikli otomobil olması öngörülmektedir. Bu çalışmada elde edilen sonuçların 2023 yılı hedefleri doğrultusunda yerli elektrikli otomobil sürecine faydalı olacağı ve bu tip motorlar üzerine seri imalata yönelik uygulamalara destek niteliği taşıdığı düşünülmektedir.

TEŞEKKÜR

Motor-Cad yazılımında yapılan analizlerle ilgili olarak Prof. Dr. Damir Zarko'ya ve Zagreb Üniversitesi Elektrik Mühendisliği ve Bilgisayar Bilimleri Fakültesinin vermiş olduğu destek için teşekkür ederim.

KAYNAKLAR

- [1] Guechi M.R., Desevaux P., Baucour P., Espanet C., Brunel R. ve Poirot M. (2015). Experimental Study on the Improvement of the Thermal Behavior of Electric Motors. *Int. J. of Thermal & Environmental Engineering*, 9(2), 91-97.
- [2] Fakhfakh M. A., Kasem M.H., Tounsi S. ve Neji R. (2008). Thermal Analysis of a Permanent Magnet Synchronous Motor for Electric

- Vehicles. *Journal of Asian Electric Vehicle*, 6(2), 1145-1151.
- [3] Herbert J., Arafat A., Wang G. ve Choi S. (2016). Investigation of a Thermal Model for a Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Motor. *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, Long Beach, CA, USA, 20-24 Mart.
- [4] Zhu, S., Hu, Y., Liu, C. ve Wang, K. (2018). Iron Loss and Efficiency Analysis of Interior PM Machines for Electric Vehicle Applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 65(1), 114-124.
- [5] Uma Devi K. ve Sanavullah M.Y. (2011). Performance Analysis Of Exterior(Outer) Rotor Permanent Magnet Brushless Dc (Erpmblde) Motor By Finite Element Method. *3rd International Conference on Electronics Computer Technology (ICECT)*, Kanyakumari, India, 8-10 Nisan.
- [6] Cabuk A.S. (2016). A Novel Approach to Optimized Design of In-Wheel BLDC Motors. Doktora Tezi, Marmara Üniversitesi, Türkiye, s. 77-83.
- [7] Motor sargı yalıtım sınıfları ve çalışma sıcaklıkları, www.emo.org.tr/ekler/2095bad7034daef_ek.pdf (17.06.2018)
- [8] Motor sargı yalıtım sınıfları ve çalışma sıcaklıkları, www.siemens.com.tr (17.06.2018)
- [9] Vansompel, H., Hemeida, A. ve Sergeant, P. (2017). Stator Heat Extraction System for Axial Flux Yokeless and Segmented Armature Machines. *IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC)*, Miami, FL, USA, 21-24 Mayıs.
- [10] Nerg J., Rilla M. ve Pyrhönen J. (2008). Thermal Analysis of Radial Flux Electrical Machines with a High Power Density. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 55(10), 3543 – 3554.
- [11] Cabuk A.S. (2019). *Mühendislik Alanında Araştırma ve Değerlendirmeler, Chapter 6 Tekerlekiçi Furçasız Doğru Akım Motorlarının Isıl Devre Modeli İle Sıcaklık Etkilerinin İncelenmesi*. Ankara, Türkiye: Gece Akademi.
- [12] ABB Distribution Automation Handbook (2011). Erişim Adresi: <https://new.abb.com/medium-voltage/distribution-automation/misc/distribution-automation-handbook>
- [13] ABB Motor Protection Calculation Tool for SPAM 150 C, User's Manual and Technical Description (2002) Erişim Adresi: https://library.e.abb.com/public/9fa937448521cc28c2256bf1002d7252/FM_SPAM150C_750637_ENbab_2010.
- [14] Hakola, T. (1982). Application guide for protection of synchronous machines, ABB Relays Erişim Adresi: <https://new.abb.com/medium-voltage/distribution-automation/numerical-relays/motor-protection-and-control>.

Türkiye İnşaat Sektöründe 2016 ve 2017 Yıllarında Meydana Gelen İş Kazalarının İstatistiksel Olarak Karşılaştırılması

Statistical Comparison of The Work Accidents in Turkish Construction Sector in Year Of 2016 and 2017

Oğuz UZDİL¹ , Arif Nihat GÜLLÜOĞLU¹ 

¹Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İş Güvenliği Anabilim Dalı, İstanbul.

Öz

Ülkemizde yapılmakta olan inşaat sayılarındaki artış, iş kazası miktarlarını da oldukça yakından etkilemektedir. Gerekli önlemlerin alınmasındaki ihmal, fazla ve yoğun mesai süresi, aşırı özgüven, yeterli iş sağlığı ve güvenliği eğitimlerinin verilmemesi inşaat alanlarındaki kazaları tetiklemektedir. Bu çalışmada, 2017 yılında meydana gelen kazalar, 2016 yılında meydana gelen kazalarla karşılaştırılarak incelenmiştir. Bu inceleme için Sosyal Güvenlik Kurumu (SGK) 2016 ve 2017 yıllarının verileri esas alınmıştır. SGK verilerine dayanarak inşaat sektörü; bina inşaatı, bina dışı yapıların inşaatı ve özel inşaatlar olmak üzere üç alt kategori olarak değerlendirilmiştir. Bu incelemeler sonucunda 2017’de inşaat sektöründe yaşanan iş kazalarının 2016’ya oranla arttığı ve bunun sonucunda ölüm sayısında da yükselme olduğu gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: İnşaat Sektörü, İş Güvenliği, Kaza İstatistikleri, İş Kazaları

Abstract

The increase in the number of construction in our country also affects the number of accidents very closely. The negligence to take required precautions overtime, excessive self-confidence and lack of adequate occupational health and safety trainings triggers accidents at construction sites. In this study, the accidents occurred in 2017 were compared with the accidents that occurred in 2016. This review is based on Social Security Institution (SGK) 2017 and 2016 data. Based on the SGK data, the construction sector has been evaluated in three sub categories: building construction, constructions besides buildings and private constructions. As a result of these investigations, it was observed that the number of work accidents in the construction sector increased in 2017 compared to 2016 and the number of deaths increased as a result.

Keywords: Construction Sector, Occupational Safety, Accident Statistics, Work Accidents

I. GİRİŞ

İnşaat sektörü, ekonomiye sağladığı katma değer ve istihdam olanakları açısından lokomotif sektör olma özelliği taşımaktadır. Dünyanın birçok ülkesinde olduğu gibi ülkemiz inşaat sektöründe de yaşanan iş kazaları büyük sorun teşkil etmektedir. Sosyal Güvenlik Kurumu istatistiklerine göre inşaat sektörü Türkiye’de yaşanan iş kazalarının sayıca fazla olduğu ilk üç sektör arasında bulunmasının yanı sıra, can kayıpları açısından tüm sektörler içerisinde ilk sırada yer almaktadır. 2016 yılı SGK verilerine göre Türkiye’de bulunan 1 milyon 749 bin 240 iş yerinin 195 bin 990’ı inşaat sektörünü kapsamaktadır. Tüm sektörlerde çalışanların %13,7’si inşaat sektöründe istihdam edilmektedir. İş kazalarının %15,6’sı ekonomi ve istihdam açısından büyük önem taşıyan inşaat sektöründe yaşanmış olup, ölümlü iş kazaları bakımından sektör %35,3’lük oranla tüm faaliyet alanları içerisinde ilk sırada yer almaktadır [1].

İnşaat sektöründe yaşanan yüksek kaza oranları ve ağırlığı dikkate alınarak Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığınca 2012 yılında yayımlanan “İş Sağlığı ve Güvenliğine İlişkin İşyeri Tehlike Sınıfları Tebliği”ne göre işyerlerinin ekonomik faaliyet alanlarına ilişkin tehlike sınıflarında inşaat sektörü “çok tehlikeli” sınıfına giren iş kolları arasında yer almaktadır [2]. Bu nedenle inşaat sektörü ile ilgili kazalar kritik olaylardır ve temel nedenlerini anlamak ve tanımlamak için analiz edilmeleri gerekmektedir [3].

Ülkemizde faaliyet gösteren işyerlerinin geneli ve inşaat sektörünün %98'i çalışan sayısı elliden az olan mikro ve küçük ölçekli işletme özelliğinde iken, çalışanların %60'ı bu işletmelerde istihdam edilmektedir. İnşaat sektörü kendi alt grupları içinde değerlendirildiğinde, işyeri sayısı %66 oranla en fazla "bina inşaatı" alt grubunda olup, çalışan sayısına göre sektör içindeki payı %64', yaşanan iş kazaları bakımından ise %56 'lık kısmı bu alt sektörde yer almaktadır. İnşaat sektörü içinde yol, su, köprü, tünel ve elektrik şebekesi inşaatı gibi "bina dışı yapıların inşaatı" alt grubunda %7 olan işyeri sayılarında %20 çalışan olmasına rağmen yaşanan iş kazası oranı %33, ölüm oranı ise %27 olarak gerçekleşmiştir. Bu veriler, inşaat sektöründe çalışan sayısı başına düşen iş kazası ve ölüm sayısı yüzdeleri değerlerine göre, "bina dışı yapıların inşaatı" alt sektöründe kazaların daha yoğun ve ağır yaşandığını göstermektedir [4].

Türkiye'de 2014 ve 2015 yıllarında meydana gelmiş iş kazaları verilerinin analiz sonuçlarına göre, 26-35 yaş aralığındaki erkeklerin, bir ay ile bir yıl arasında iş tecrübesine sahip çalışanların, nitelik gerektirmeyen işlerde çalışanların daha fazla iş kazası geçirdiği tespit edilmiştir. İnşaat ve sanayi alanlarında ise iş kazası ve ölüm sayısının daha fazla olduğu belirtilmiştir [5]. Kuzey Yuanistan'da yapılan bir çalışmada, inşaat sektörü ile ilgili en sık karşılaşılan kazalar araştırılmış ve kazaların çeşitli parametreleri arasındaki ilişkiler belirlenmiştir. Araştırma sonucunda kazaya uğrayanların çoğunlukla 22-44 yaş arası deneyimsiz personel olduğu, en çok görülen kaza tipinin düşme şeklinde gerçekleştiği, erkeklerin kadınlara göre ölümcül yaralanmalara daha çok maruz kaldığı, kazaların çoğunlukla sabah saatlerinde gerçekleştiği saptanmıştır [3].

İnşaat sektöründe meydana gelen iş kazalarının analiz edilmesi ve bu kazaların etkilerinin incelenmesi sonucunda, iş kazalarının %88 oranında tehlikeli hareketler, %10 oranında tehlikeli koşullar ve %2 oranında kaçınılmazlık nedeni ile meydana geldiği gösterilmiştir [6]. Türkiye'de inşaat sektöründe en fazla meydana gelen iş kazaları bina, tünel, kanal ve yol inşaatı olarak sınıflara ayrılmış ve bu kazaların nedenleri üzerinde durulmuş, bu nedenler araştırılırken şantiye farklılıklarının da göz önünde bulundurulması gerektiği belirtilmiştir [7]. 2015 Ocak ile 2017 Kasım tarihleri arasında şantiyelerde yaşanan 107 iş kazasının incelemesi sonucunda üstyapı şantiyelerinde meydana gelen kazaların altyapı şantiyelerine oranla daha fazla olduğu tespit edilmiştir [8].

Şantiyelerde meydana gelen kazalar, insanların, nesnelere veya materyallerin taşınması sırasında mülklerin zarar görmesine veya insanların yaralanmasına neden olabilecek planlanmamış olaylardır. Kazaların çoğu güvensiz davranışlar ve güvensiz koşullar nedeniyle meydana gelmektedir.

İnşaat işyerlerindeki tüm tehlikelerin tanımlanması ve ortadan kaldırılması her zaman mümkün olmadığından, kritik verilerin toplaması için etkili kaza araştırma yöntemleri şarttır. İnşaat kazaları, sadece kaza nedenleri teorileri ve insan hataları teorileri gibi kaza inceleme teknikleriyle mümkün olan kazaların temel nedenlerini belirleyerek önlenmektedir. Bu teoriler kazaların neden meydana geldiğine dair fikir vermektedir [9].

Doğru önlemler ancak tehlikelerin tanımlanması, ortaya çıkan risklerin doğru ve kapsamlı bir şekilde belirlenmesi ile saptanabilir. Bununla birlikte, risk değerlendirmesinin bir işyerindeki tehlikeleri kısa sürede gidermesi beklenmemelidir. Aksine, bu uzun vadeli kalıcı bir çalışma ile elde edilebilir. Dolayısıyla temel prensip sürekli iyileştirme olmalıdır. Yöneticiler için kuruluştaki tehlikeler ve riskler hakkında eğitim ve iletişimi teşvik etmeleri de büyük önem taşımaktadır. Bu şekilde personel arasında risk bilinci artacaktır ve tehlikeleri ortadan kaldırmak için aktif katkıyı teşvik edecektir [10].

İnşaat sektöründeki sayıca fazla olan iş kazalarının azaltılması için önlemler alınması gerekmektedir. Bu önlemleri alabilmek için öncelikle iş sağlığı ve güvenliği, iş kazası kavramlarının iyi bilinmesi gerekmektedir.

1.1. İş Sağlığı ve Güvenliği Kavramı

İş sağlığı ve güvenliğinin modern ve geleneksel anlamda iki tanımlaması bulunmaktadır. Geleneksel olarak yapılan tanım: "iş yerlerini işin işleyişi sebebiyle oluşan tehlikelerden uzaklaştırmak ve sağlığa zarar verebilecek durumlardan arındırarak, çalışma ortamını iyileştirmek amacıyla yapılan sistematik çalışmalar" dır. Diğer bir tanım olan modern tanım ise; "iş görenleri işin uygulanması esnasında ortaya çıkan sağlığa zararlı koşullardan ve güvenliği bozacak durum ve davranışlardan korunmak, üretimin sürekliliğini sağlamak ve verim düzeyini artırmak amacıyla yürütülen sistematik ve bilimsel çalışmalar" dır [5]. İş Sağlığı ve güvenliği çalışmalarında öncelikle çalışanların sağlık ve güvenliğinin, daha sonra üretim ve işletme güvenliğinin sağlanması konuları ele alınmaktadır [11].

1.2. İş Kazası Kavramı

Dünya Sağlık Örgütü (WHO) tarafından iş kazası: "önceden planlanmamış, genellikle yaralanmalara, makine ve materyalin zarar görmesine veya üretim sürecinin duraklamasına neden olan olay" olarak tanımlanmaktadır. Uluslararası Çalışma Örgütü (ILO) ise iş kazasını "belirli bir zarar veya yaralanmaya sebebiyet veren, planlanmamış öngörülemeyen bir olay" şeklinde tanımlamaktadır [12]. 6331 sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu'na göre iş kazası: "iş

yerinde veya işin uygulanması sebebiyle ortaya çıkan, ölüme neden olan veya vücut bütünlüğünü ruhen ya da bedenen engelli hale getiren olay” olarak tanımlanmaktadır [11].

İş yerlerinde insan sağlığı üzerinde doğrudan ve dolaylı olarak etkilere yol açabilen fiziksel, kimyasal, mekanik ve ergonomik faktörler bulunmaktadır. İşyerindeki bu olumsuz çalışma koşullarının etkilerinden dolayı iş kazaları meydana gelmektedir. İş kazalarının oluşmasında üretim teknolojisi, üretim araçları, çevre koşulları, sosyolojik, psikolojik, fizyolojik birçok etken rol oynamaktadır. İş kazalarının oluşmasına neden olan etkenler temelde, işyerlerindeki güvensiz durumlar ile çalışanların yaptığı güvensiz davranışlardan kaynaklanmaktadır.

1.3. Dünya’da ve Türkiye’de İş Sağlığı ve Güvenliği

18. yüzyılın ilk yarısından itibaren İngiltere’de başlayan sanayi devrimi ile üretim süreci büyük değişime uğramış, ilk evrede atölyelere daha sonra da gelişen teknoloji ile büyük makinelerin yer aldığı fabrika sistemine geçiş yaşanmıştır. İşverenlere bağlı, ücrete tabi çalışan işçi sayısı zamanla artmış ve bu sınıfın çalışma şartları, yapılan işlerin ortaya çıkardığı riskler, kazaları ve birtakım sağlık ve güvenlik sorunlarını da beraberinde getirmiştir. Çalışma ve hayat koşullarını daha iyi hale getirmek, çalışanların sağlığını güvence altına almak ve iş güvenliğini sağlamak için gerçekleştirilen birçok yasal düzenlemeler, Avrupa’daki diğer ülkeler için de emsal teşkil etmiştir. Başlangıçta Birleşmiş Milletlere bağlı bir organizasyon olarak kurulan Uluslararası Çalışma Örgütü (ILO) 1919 yılında kurulmuştur. Daha sonra Birleşmiş Milletler ile imzalanan bir antlaşma ile 1946 yılında bağımsız bir kuruluş şekline getirilmiştir [13].

Çalışanların, iş kazası ve meslek hastalıklarına karşı korunmasını amaçlayan ilk yasal organizasyonlar 19.yy sonlarında karşımıza çıkmaktadır. Türkiye’de

çalışma hayatını düzenleyen ilk iş kanunu, 1936 tarihli 3008 sayılı İş Kanunu’dur. Bu kanun iş sağlığı ve güvenliği konusunda düzenlemeler içermektedir [13]. Türkiye’de İşçi Sağlığı Genel Müdürlüğü 1945 yılında kurulmuştur. Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığına bağlı olarak faaliyette bulunan kuruluş, 2000 yılında yeniden yapılandırılarak İşçi Sağlığı ve Güvenliği Genel Müdürlüğü olarak değiştirilmiştir [14]. 2012 yılında yürürlüğe giren 6331 sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu, çalışan ve işverenler için önemli düzenlemeler içermektedir [15]. 6331 sayılı Kanunun amacı, işyerlerinde iş sağlığı ve güvenliğinin sağlanması ve mevcut sağlık ve güvenlik şartlarının iyileştirilmesi için işveren ve çalışanların görev, yetki, sorumluluk, hak ve yükümlülüklerini düzenlemektedir [11]. Bu kanun ile birlikte kamu ve özel sektör ayrımı yapılmadan tüm kazalar değerlendirilmektedir [6].

Bu çalışmada, 2016 ve 2017 yıllarında meydana gelen iş kazaları, meslek hastalıkları ve bunlara bağlı ölüm oranları incelenerek değerlendirilmesi yapılmıştır. SGK verilerine dayanarak inşaat sektörü bina inşaatı, bina dışı yapıların inşaatı ve özel inşaatlar olmak üzere üç alt kategori olarak değerlendirilmiştir.

II. YÖNTEM

Bu çalışmada SGK tarafından yayınlanan Türkiyede faaliyet gösteren tüm sektörlerin toplamı ile İnşaat sektöründe meydana gelen iş kazalarının 2016 ve 2017 yıllarına ait verileri istatistiksel olarak karşılaştırılmıştır. Kullanılan SGK verileri 2013-2017 yılları arasını kapsamaktadır ve 4A güvencesine sahip çalışanları içermektedir. Bu veriler analiz edilerek değerlendirilmeye çalışılmıştır.

III. BULGULAR

Türkiye’de inşaat sektöründe en çok meydana gelen kaza tipleri sırasıyla Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Türkiye’de inşaat sektöründeki başlıca kaza tipleri [16]

No	Ana Gruplar Kaza Tipi	Ölüm		Yaralanma		Toplam	
		Sayı	%	Sayı	%	Sayı	%
1	İnsan Düşmesi	1028	42,9	934	32,9	1962	37,4
2	Malzeme Düşmesi	251	10,5	278	9,8	529	10,1
3	Malzeme Sıçraması	10	0,4	211	7,4	221	4,2
4	Kazı Kenarının Göçmesi	138	5,8	53	1,9	191	3,6
5	Yapı Kısmının Göçmesi	167	7,0	73	2,6	240	4,6
6	Elektrik Çarpması	293	12,2	80	2,8	373	7,1
7	Patlayıcı Madde Kazaları	50	0,2	82	2,9	132	2,5
8	Yapı Makinesi Kazaları	206	8,6	97	3,4	303	5,8
9	Uzuv Kaptırma	1	0,0	604	21,3	605	11,5

10	Uzuv Sıkışması	1	0,0	200	7,0	201	3,8
11	El Aleti ile Ele Vurma	0	0,0	42	1,5	42	0,8
12	Sivri Uçlu Keskin Ken. Cis. Yara.	0	0,0	75	2,6	75	1,4
13	Şantiye İçi Trafik Kazaları	168	7,0	38	1,3	206	3,9
14	Diğer Tip Kazalar	85	3,5	74	2,6	159	3,0
Toplam		2398	100,0	2841	100,0	5239	100,0

Kaza türleri incelendiğinde, inşaatlarda insan düşmesi tipindeki kaza tipi en başta gelmektedir. Bunun nedeni gerekli önlemlerin alınmaması, uyarı levhalarının bulunmaması, işçilere gereken iş eğitiminin detaylı olarak anlatılmamasıdır. İkinci sırada yer alan malzeme düşmesi tipi kazaların nedeni olarak düzensiz çalışma ortamı ve dikkatsizlik olarak değerlendirilmektedir. Malzeme sıçraması tipindeki

kazalar kişisel koruyucu ekipmanların kullanılması ile azaltılabilir.

Tablo 2’de Türkiye’de 2016 yılında inşaat sektörünün bina inşaatı, bina dışı yapıların inşaatı, özel inşaat faaliyetleri bölümlerine göre iş kazası, meslek hastalığı ve ölüm sayıları tüm sektörlerle kıyaslanarak verilmiştir.

Tablo 2. 2016 yılında inşaat sektörü ve Türkiye genelinde meydana gelen iş kazası, meslek hastalığı ve ölüm sayıları [17]

Sektörler	İş Kazası	Meslek Hastalığı	Ölüm
Bina inşaatı	20.159	16	239
Bina dışı yapıların inşaatı	9.516	7	130
Özel inşaat faaliyetleri	14.877	7	127
Tüm İnşaatlar Toplamı	44.552	30	496
Tüm Sektörler Toplamı	286.068	597	1.405

Tüm sektörler oranlandığında, 2016’da meydana gelen iş kazalarının %7,05’ini bina inşaatları, %3,32’sini bina dışı yapıların inşaatı, %5,20’sini özel inşaat faaliyetleri oluşturmaktadır. İnşaatın bu üç sektöründe meydana gelen toplam iş kazaları ise tüm sektörlerde meydana gelen iş kazalarının %15,57’sini oluşturmaktadır.

Tüm sektörler oranlandığında, 2016’da yaşanan ölüm vakalarının %17,01’ini bina inşaatları, %9,25’ini bina dışı yapıların inşaatı, %9,04’ünü özel inşaat faaliyetleri oluşturmaktadır. İnşaatın bu üç sektöründe meydana gelen toplam ölüm sayısı ise tüm sektörlerde yaşanan ölüm vakalarının %35,30’unu oluşturmaktadır.

Tüm sektörler oranlandığında, 2016’da meydana gelen meslek hastalıklarının %2,68’ini bina inşaatları, %1,17’sini bina dışı yapıların inşaatı, %1,17’sini özel inşaat faaliyetleri oluşturmaktadır. İnşaatın bu üç sektöründe meydana gelen toplam meslek hastalığı sayısı ise tüm sektörlerde meydana gelen meslek hastalıklarının %5,02’sini oluşturmaktadır.

Tablo 3’te Türkiye’de 2017 yılında inşaat sektörünün bina inşaatı, bina dışı yapıların inşaatı, özel inşaat faaliyetleri bölümlerine göre iş kazası, meslek hastalığı ve ölüm sayıları tüm sektörlerle kıyaslanarak verilmiştir.

Tablo 3. 2017 yılında inşaat sektörü ve Türkiye genelinde meydana gelen iş kazası, meslek hastalığı ve ölüm sayıları [17]

Sektörler	İş Kazası	Meslek Hastalığı	Ölüm
Bina inşaatı	34.952	11	340
Bina dışı yapıların inşaatı	20.873	3	158
Özel inşaat faaliyetleri	6.977	2	89
Tüm İnşaatlar Toplamı	62.802	16	587
Tüm Sektörler Toplamı	359.653	691	1.633

Tüm sektörler oranlandığında, 2017’de meydana gelen iş kazalarının %9,72’sini bina inşaatları, %5,80’ini bina dışı yapıların inşaatı, %1,94’ünü özel inşaat faaliyetleri oluşturmaktadır. İnşaatın bu üç sektöründe meydana gelen toplam iş kazaları ise tüm

sektörlerde meydana gelen iş kazalarının %17,46’sını oluşturmaktadır.

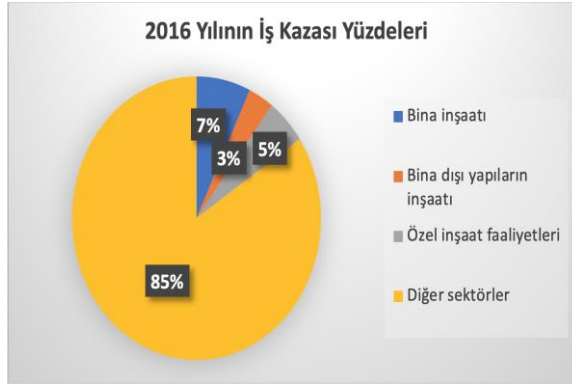
Tüm sektörler oranlandığında, 2017’de meydana gelen meslek hastalıklarının %1,59’unu bina

inşaatları, %0,43'ünü bina dışı yapıların inşaatı, %0,29'ünü özel inşaat faaliyetleri oluşturmaktadır. İnşaatın bu üç sektöründe meydana gelen toplam meslek hastalığı sayısı ise tüm sektörlerde meydana gelen meslek hastalıklarının %2,31'ini oluşturmaktadır.

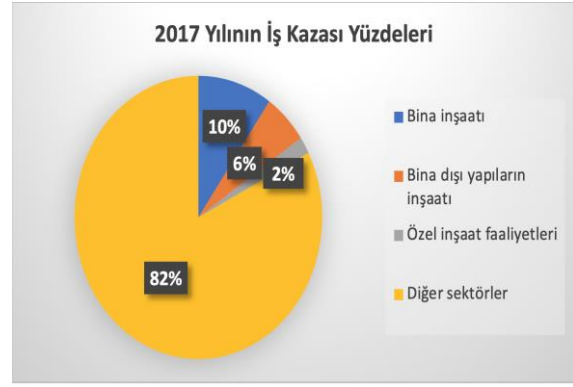
Tüm sektörlerle oranlandığında, 2017'de yaşanan ölüm vakalarının %20,82'sini bina inşaatları, %9,67'sini bina dışı yapıların inşaatı, %5,45'ini özel

inşaat faaliyetleri oluşturmaktadır. İnşaatın bu üç sektöründe meydana gelen toplam ölüm sayısı ise tüm sektörlerde yaşanan ölüm vakalarının %35,94'ünü oluşturmaktadır.

2016 ve 2017 yıllarında inşaat sektörünün alt dalları olan bina inşaatı, bina dışı yapıların inşaatı ve özel inşaat faaliyetleri ile diğer sektörlerde meydana gelen iş kazalarının oranları grafik olarak Şekil 1'de gösterilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 1. Sektörlere göre iş kazası yüzdeleri: (a) 2016 yılı, (b) 2017 yılı [17]

Grafikler incelendiğinde 2017 yılında, 2016 yılına oranla bina türü inşaatlar ve bina dışı inşaatlarda kaza miktarı %3 artmıştır. Buna karşın 2017 yılında, 2016 yılına göre özel inşaat faaliyetlerinde yaşanan iş kazası miktarı %3 oranında azalmıştır. İş kazası oranı

olarak inşaat sektörü, tüm sektörler içerisinde ortalama %16,5'lik bir paya sahiptir.

Türkiye'de 2016 ve 2017 yıllarında inşaat sektöründe iş kazası geçirenlerin eğitim durumlarına göre sayıları ve oranları Tablo 4'te gösterilmiştir.

Tablo 4. 2016 ve 2017 yıllarında inşaat sektöründe iş kazası geçiren sigortalıların eğitim durumlarına göre dağılımı [1]

Eğitim Durumu	2016		2017	
	İş Kazası Geçiren Sigortalı Sayısı	%	İş Kazası Geçiren Sigortalı Sayısı	%
İlkokul	14.357	32,36	19.870	31,64
Ortaokul	7.900	17,80	12.040	19,17
Lise	7.093	15,98	11.147	17,75
İlköğretim	4.933	11,12	5.393	8,59
Okur-Yazar	7.358	16,58	10.576	16,84
Meslek Lisesi	906	2,04	1.163	1,85
Yüksekokul	869	1,96	1.273	2,03
Üniversite	664	1,50	921	1,47
Okur-Yazar Olmayan	275	0,62	402	0,64
Master, Yüksek Mühendis vb.	15	0,03	13	0,02
Doktora	3	0,01	4	0,01
Toplam	44.373	100,00	62.802	100,00

2016 ve 2017 yıllarında eğitim durumuna göre en çok iş kazası geçiren ilkökul seviyesindeki çalışanlar iken, en az iş kazası geçirenler doktora seviyesindedir. Her

iki yılda da bu sıralamanın değişmediği görülmektedir. Bu tablodan eğitim seviyesi ile iş kazası geçirme ihtimalinin doğrudan ilişkili olduğu

söylenbilir. Ayrıca eğitim seviyesi yüksek kişilerin de daha az tehlikeli işlerde çalıştığı bilinmektedir.

2016 ve 2017 yıllarında Türkiye’de iş kazası geçirenlerin yaş gruplarına göre dağılımı Tablo 5’te verilmiştir.

Tablo 5. 2016 ve 2017 yıllarında inşaat sektöründe iş kazası geçiren sigortalıların yaşa göre dağılımı [1]

Yaş	2016		2017	
	İş Kazası Geçiren Sigortalı Sayısı	%	İş Kazası Geçiren Sigortalı Sayısı	%
14-19	2.568	5,79	4.125	6,57
20-34	21.795	49,12	31.240	49,74
35-49	14.913	33,61	20.353	32,41
50-64	4.968	11,20	6.914	11,01
65 ve üstü	129	0,29	170	0,27
Toplam	44.373	100,00	62.802	100,00

2016 ve 2017 yıllarında inşaat sektöründe meydana gelen iş kazaları en çok 20-34 yaş aralığında meydana gelmektedir. Bunun nedeni olarak genç işçilerin daha ağır işlerde çalıştırıldığı görülmektedir. Ayrıca 20-34 yaş aralığında tecrübesiz işçilerin daha çok olması hata riskini artırmakta ve bu da iş kazalarının meydana gelme olasılığını yükseltmektedir. 35 yaş ve üstü yaş gruplarında iş kazası geçirenlerin sayısının azalması tecrübe ile direkt olarak ilgilidir. Tecrübe

arttıkça hata yapma oranı azalmakta ve iş kazası geçirme ihtimalini de azaltmaktadır. Ayrıca 35 yaş ve üstü yaş gruplarında ağır işlerde çalışma oranı daha azdır.

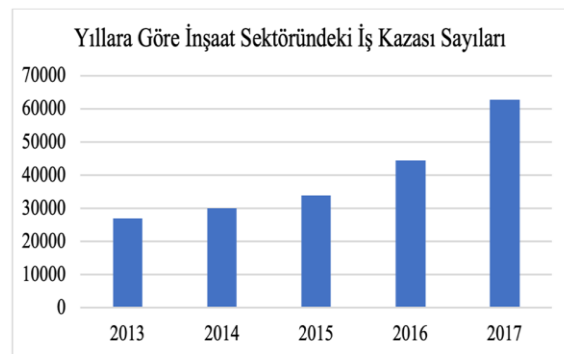
Türkiye’de inşaat sektöründe iş kazası oranının fazla olduğu İstanbul, İzmir, Ankara, Kocaeli ve Bursa illerindeki iş kazası sayıları Tablo 6’da verilmiştir.

Tablo 6. 2016 ve 2017 yıllarında inşaat sektöründe en çok iş kazasının meydana geldiği iller [1]

İl	2016		2017	
	İş Kazası Sayısı	%	İş Kazası Sayısı	%
İstanbul	15.843	35,70	22.887	37,24
İzmir	3.108	7,00	5.549	9,03
Ankara	4.198	9,46	4.849	7,89
Kocaeli	1.451	3,27	2.163	3,52
Bursa	1.496	3,37	1.895	3,08
Toplam	44,373	100,00	61.450	100,00

Hem 2016 hem de 2017 yıllarında inşaat sektöründe meydana gelen iş kazası sayılarına bakıldığında birinci sırada İstanbul yer almaktadır. 2016 yılında en çok iş kazasının meydana geldiği ikinci il Ankara iken, 2017 yılında iş kazası sayısındaki artıştan dolayı ikinci sırada İzmir yer almaktadır. 2016 yılında Bursa’da meydana gelen iş kazası sayısı Kocaeli ilinde meydana gelen kaza sayısından daha fazla iken, 2017 yılında Kocaeli ilinde Bursa ilinden daha fazla iş kazası meydana gelmiştir.

Türkiye’de 2013-2017 yılları arasında inşaat sektöründe meydana gelen iş kazası sayıları Şekil 2’de gösterilmiştir.



Şekil 2. 2013-2017 yılları arasında inşaat sektöründeki iş kazası sayıları [17]

Son beş yılda inşaat sektöründe meydana gelen iş kazaları incelendiğinde: 2013 yılında 27.037, 2014 yılında 30.015, 2015 yılında 33.979, 2016 yılında 44.552, 2017 yılında 62.802 iş kazası meydana gelmiştir. 2013-2014-2015 yıllarında inşaat sektöründe meydana gelen iş kazası sayısı ortalaması 30.343 iken 2016 ve 2017 yıllarında ortalama 53.677 iş kazası meydana gelmiştir. İnşaat sektöründe 2017

yılında meydana gelen iş kazası sayısında, 2016 yılına göre 18.250 artış gözlemlenmiştir.

Türkiye’de iş kazalarının meydana gelme sayıları incelendiğinde başta gelen ilk üç sektör; makine/metal sektörü, inşaat sektörü ve maden sektörüdür. Bu üç sektörün iş kazası sayıları, meslek hastalığı sayıları ve ölüm sayıları Tablo 7’de verilmiştir.

Tablo 7. Türkiye’de en çok iş kazasının meydana geldiği üç sektör [17]

Sektörler	2016			2017		
	İş Kazası	Meslek Hastalığı	Ölüm	İş Kazası	Meslek Hastalığı	Ölüm
Makine/Metal	62.264	125	96	73.611	177	114
İnşaat	44.552	30	496	62.802	16	587
Maden	11.792	79	83	13.052	55	86
Tüm Sektörler Toplamı	286.068	597	1.405	359.653	691	1.633

Tablo incelendiğinde ülkemizde hem 2016 hem de 2017 yıllarında en çok iş kazasının meydana geldiği sektör makine/metal sektörüdür. İnşaat sektörü ise iş kazası sayısına göre sıralamada ikinci sırada yer almaktadır. Buna karşın, 2016 ve 2017 yıllarında ölümle sonuçlanan kazalarda ilk sırada inşaat sektörünün yer aldığı görülmektedir. Meslek hastalığına yakalanma durumlarına bakıldığında, her iki yıl için de makine/metal ve maden sektörlerinde meslek hastalığı riskinin daha fazla olduğu söylenebilir.

IV. SONUÇLAR

Kaza türleri incelendiğinde, inşaat sektöründe en fazla meydana gelen iş kazası insan düşmesi tipindeki kazalardır.

2016 ve 2017’de inşaat sektöründe yaşanan iş kazaları karşılaştırıldığında, 2017 yılında bina inşaatları ve bina dışı inşaatlardaki kazalar %3 artarken özel inşaatlardaki kazaların %3 oranında azaldığı görülmektedir.

Eğitim durumlarına göre inşaat sektöründeki iş kazaları incelendiğinde ilk sırada ilköğretim seviyesindeki çalışanların kazaya uğradığı görülmüştür. İşverenlerin iş ile ilgili bilgilendirme ve eğitimlerin artırılması ile eğitim durumu nedeni ile karşılaşılan kazalarda azalma olması öngörülmektedir. Ayrıca eğitim seviyesinin düşük olması öz güven duygusunu da artırmaktadır.

İnşaat sektöründe yaş gruplarına göre iş kazaları incelendiğinde en çok kazaya uğrayan yaş grubunun 20-34 yaş aralığında olduğu sonucuna varılmıştır. Buna göre tecrübesiz çalışanların iş kazasına uğrama olasılığının daha yüksek olduğu söylenebilir.

İllere göre bakıldığında inşaat sektöründe yaşanan en fazla kazanın İstanbul ilinde meydana geldiği belirlenmiştir. İstanbul’da iş kazası miktarının fazla olma nedenleri; nüfus yoğunluğu, kentsel dönüşümden dolayı yapılaşmadaki artış ve büyük şehrin getirdiği stres ortamı olarak gösterilebilir.

2016 ve 2017 yıllarında inşaat sektöründe meydana gelen iş kazaları diğer sektörlerle kıyaslandığında, iş kazası sıralamasında ikinci sırada yer alırken; ölümlü kaza sıralamasında birinci sırada yer almaktadır.

2013-2017 yılları arasında inşaat sektöründe meydana gelen iş kazaları incelendiğinde, kaza sayısı yıllar bazında sürekli artarak 2017 yılında iş kazası miktarında en büyük artış gerçekleşmiştir. Bunun nedeni 2012 yılında iş sağlığı güvenliği kanununun yürürlüğe girmesi ile kazaların kayıt altına alınması ve inşaat sektöründeki hızlı büyümedir.

Tehlikeler ve doğuracağı risklerin detaylı araştırmalar ile tespit edilmesi yeterli önlemler alınabilmesinin ön koşuludur. İş yerlerinde yapılan bu risk değerlendirmeleri uzun bir zaman sürecini kapsamaktadır. Bu şekilde sürekli iyileştirme prensibi hedef edilerek kalıcı sonuçlar elde edilebilir. Yöneticiler iş yerlerindeki tehlikeler ve riskler hakkında çalışanları bilgilendirmeli, bu konuda eğitimler düzenleyerek risk bilinci oluşturmayı hedeflemelidir. Çalışanların da katkıda bulunması ile tehlikeleri ortadan kaldırmak için yapıcı çözümler üretilmesi sağlanabilir.

Türkiye’de inşaat sektöründeki kazaların azaltılması için gerekli önlemlerin hızlı bir şekilde alınması gerekmektedir. İş sağlığı ve güvenliği bilinci ve kültürünü oluşturmak iş sağlığı ve güvenliği eğitimlerinin artırılması ile sağlanabilecektir.

KAYNAKLAR

- [1] T.C. Aile, Çalışma ve Sosyal Hizmetler Bakanlığı. (2019, Ocak). İnşaat Sektöründe İş Sağlığı ve Güvenliği : <http://www.guvenliinsaat.gov.tr/genelbilgi.html>
- [2] T.C. Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı. (2012). İş Sağlığı ve Güvenliğine İlişkin İşyeri Tehlike Sınıfları Tebliği. Resmi Gazete Sayı:28509, 26/12/2012.
- [3] Betsis, S. Kalogirou, M., Aretoulis, G. & Pertziniidou M. (2019). Work Accidents Correlation Analysis for Construction Projects in Northern Greece 2003–2007: A Retrospective Study. *Safety*, 5, 33.
- [4] Güllüoğlu, E.N. ve Güllüoğlu, A.N. (2019). Türkiye İnşaat Sektöründe İstihdam ve İş Kazalarının Analizi. *Karaelmas İş Sağlığı ve Güvenliği Dergisi*, 3(2), 65-81.
- [5] Gümüş, R. (2017). Türkiye’de 2015 Yılında Meydana Gelen İş Kazalarının Analizi ve 2014 Yılı Verileri ile Karşılaştırılması. *International Journal of Social Science Studies*, 55, 227-287.
- [6] Hacıbektaşoğlu, SE. (2018). İnşaat Sektöründe Yaşanan İş Kazalarının Analizi ve Bu Kazalara Neden Olan Etkenlerin İncelenmesi. *Stratejik ve Sosyal Araştırmalar Dergisi*, 2(3), 159-177.
- [7] Çavuş, A. ve Taçgım, E. (2016). Türkiye’de İnşaat Sektöründeki İş Kazalarının Sınıflandırılarak Nedenlerinin İncelenmesi. *APJES,IV(II)*, 13-14.
- [8] Bayram, S. (2018). Şantiyelerde Yaşanan Güncel İş Kazaları, Çalışan Farkındalıkları ve Eğitim Seviyeleri Arasındaki İlişki. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 33(1), 241-252.
- [9] Hosseinian, SS. ve Torghabeh, ZJ. (2012). Major Theories Of Construction Accident Causation Models: A Literature Review. *International Journal of Advances in Engineering & Technology*, 4(2), 53-66.
- [10] Gunduz, M. ve Laitinen, H. (2018). Construction Safety Risk Assessment with Introduced Control Levels. *Journal of Civil Engineering and Management*, 24(1), 11–18.
- [11] İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu. (2019). <http://www.mevzuat.gov.tr/MevzuatMetin/1.5.6331.pdf>
- [12] Aksoylu, D. (2015). Türkiye’de İnşaat Sektöründeki İş Kazalarının Detaylı Analizi ve Mevzuatın Uygulamadaki Etkinliği. Ankara: Gazi Üniversitesi.
- [13] Çiçek, Ö. ve Öçal, M. (2016). Dünyada Ve Türkiye’de İş Sağlığı Ve İş Güvenliğinin Tarihsel Gelişimi. *HAK-İŞ Uluslararası Emek ve Toplum Dergisi*, 5 (11), 106 – 129.
- [14] Ercan, A. (2010). Türkiyede Yapı Sektöründe İşçi Sağlığı ve Güvenliğinin Değerlendirilmesi. *Politeknik Dergisi*, 13 (1), 19-53.
- [15] Mutlu, NG. ve Altuntaş, S. (2017). Türkiye’de 1974-2016 Yıllarında İş Sağlığı ve Güvenliği Alanında Yapılan Lisansüstü Tezlerin Profili. *Karaelmas Fen ve Müh. Derg.*, 7(2), 509-535.
- [16] Müngen, U. (2011). İnşaat Sektörümüzdeki Başlıca İş Kazası Tipleri. *TMH, İnşaat Mühendisleri Odası*, 496(5), 32-39.
- [17] T.C. Sosyal Güvenlik Kurumu. (2018, Kasım). SGK İstatistik Yıllıkları: http://www.sgk.gov.tr/wps/portal/sgk/tr/kurumsal/istatistik/sgk_istatistik_yilliklari

Machine Learning Based Approach for Predicting of Higher Heating Values of Solid Fuels Using Proximity and Ultimate Analysis

Makine Öğrenmesi ile Kısa ve Elemental Analiz Kullanarak Katı Yakıtların Üst Isı Değerinin Tahmin Edilmesi

Furkan ELMAZ¹ , Özgün YÜCEL*² , Ali Yener MUTLU¹ 

¹İzmir Kâtip Çelebi University, Electrical and Electronics Engineering, Çiğli, İzmir, Turkey

²İzmir Kâtip Çelebi University, Environmental Engineering, Çiğli, İzmir, Turkey

Abstract

Prediction of higher heating value (HHV) using proximity and ultimate analysis is an important procedure for understanding the characteristic attribute of a fuel. Researches put effort to model the relationship between the HHV value and those analyses. But conducted methods usually included only simple statistical analysis. In this paper we approach this prediction problem from the machine learning perspective, we employ four machine learning methods, i.e. linear regression, polynomial regression, decision tree regression and support vector regression to predict HHV using proximity and ultimate analysis of different type of materials. Data set used is collected from literature and is categorized, where the resulting categories are used as features to be fed to the machine learning models to create prediction models as accurate as possible. Performances of the proposed methods are evaluated with k-fold cross-validation technique and each method's pros and cons are discussed for both prediction accuracy and computational complexity. Polynomial regression proved itself as the most optimal choice among others from these perspectives.

Keywords: Biomass, coal, higher heating value, decision tree, support vector machines, cross-validation.

Öz

Kısa ve elemental analiz kullanılarak üst ısı değerinin (ÜİD) öngörülmesi, bir yakıtın karakteristik niteliğini anlamak için önemli bir prosedürdür. Araştırmalar, ÜİD değeri ile bu analizler arasındaki ilişkiyi açıklamak için modelleme çalışmaları yapmışlardır. Ancak uygulanan yöntemler genellikle sadece basit istatistiksel analizleri içermektedir. Bu makalede, bu tahmin sorununa makine öğrenme perspektifinden yaklaşılmaktadır, farklı türdeki malzemelerin kısa ve elemental analizini kullanarak ÜİD'yi tahmin etmek için dört makine öğrenme yöntemi, yani doğrusal regresyon, polinom regresyonu, karar ağacı regresyonu ve destek vektör regresyonunu kullanılmıştır. Kullanılan veri seti literatürdeki farklı kaynaklardan temin edilerek, kategorilere ayrılmış; sonuçta elde edilen kategoriler, mümkün olduğunca doğru tahmin modelleri oluşturmak için makine öğrenme modellerine beslenecek girdiler olarak kullanılmıştır. Önerilen yöntemlerin performansları k-katlı çapraz doğrulama tekniğiyle değerlendirilerek, her yöntemin performans değerleri hem tahmin doğruluğu hem de hesaplama karmaşıklığı açısından tartışılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Biyokütle, çapraz doğrulama, destek vektör makinaları, karar ağacı, kömür, üst ısı değeri.

I. INTRODUCTION

HHV is an important characteristic of a fuel, defined as the amount of heat released during the combustion of a specified amount of the material. Usage of ultimate analysis (elemental composition) of the fuel is a widely used methodology for researchers to predict HHV of a fuel. Ultimate analysis gives the elemental composition of a fuel. Its determination is relatively difficult and expensive compared to proximate analysis [2]. Various types of correlation equations between ultimate analysis (C%, H%, O%, N%, S%) and HHV (MJ/kg) have been proposed in previous studies which try to make a most accurate estimation. In Selvig et. al., Strache and Lant, D'Huart, Gumz et.al., authors attempted to estimate HHV of few types of coal with experimental data they acquired [1-4]. With little to no difference between obtained correlation equations, their methodology was to fit a linear line to the data, i.e. linear regression which is a simple statistical analysis. Even though it is known that there is a linear

relationship between ultimate analysis and HHV, expanding the hypothesis equation with different interactions of the terms could help to improve the accuracy and validity of the proposed correlations. Although the proposed correlations are satisfactory for predicting the HHV from the ultimate analysis, researchers encounter with a different problem, requirement of advanced laboratory equipment for ultimate analysis. This requirement makes the analysis of a material for its HHV harder and expensive. For this purpose, researchers resort to estimate HHV by proximate analysis. Proximate analysis of a fuel provides the percentage of the material that burns in a gaseous state (volatile matter), in the solid state (fixed carbon), and the percentage of inorganic waste material (ash), and is therefore of fundamental importance for biomass energy use [4]. This analyzing technique requires nothing more than commonly available laboratory equipment. But, as a consequence, prediction of HHV by proximate analysis resulted in worse accuracy compared to the ultimate analysis. In Matin et. al [5], authors used multiple linear regression and random forest methods to predict HHV by using proximate analysis of coals obtained from different states of USA. Even though results are extremely good, the overfitting problem and scalability of the methods for other materials are not discussed, therefore the reliability and stability of the prediction models are not clearly justified. In Parikh et.al [6], authors used a large number of data sets with different types of materials, i.e., different types of coals and biomass. They employed linear regression method to find a correlation. Obtained results were somewhat promising because authors did not split the data set into training and test folds, the true prediction capabilities of the models weren't investigated. Also, the lack of application of different modeling techniques resulted in incapability for explaining the phenomenon in-depth.

When the importance of HHV for thermo-chemical applications is concerned, development of prediction models in order to predict HHV of material rather using the proximate analysis or ultimate analysis is a crucially important step. Therefore, in this paper, we approach the prediction of HHV from the proximate analysis and ultimate analysis as a supervised machine learning problem. We merged a data set from the literature with samples consisting of proximate analysis, ultimate analysis and HHV of different types of materials. Furthermore, the samples are categorized according to the type of material and these categories are regarded as features of the HHV, which are used during the development of the models. Linear regression, decision tree regression methods which are used previously in similar studies as well as polynomial regression and support vector regression regression methods which have not been used in the literature are employed to develop prediction models. Moreover, k-fold cross-

validation technique is used to show unbiased prediction accuracy and reliability of each method.

II. METHODS

2.1. Data Collection and Preprocessing

Data set used in this paper is collected from previous studies in the literature, the data set consists of material type; material type, proximate analysis of the material, i.e., FC (%), VM (%) and ash (%), ultimate analysis of the material, i.e. C (%), H (%), O (%), N (%), S (%) and HHV (MJ/kg) [5,6]. Moreover, we categorized the material types of each data set into 14 categories, i.e. coals/coke, manufactured fuel/wood, pit/shells/seeds/cobs, wood/energy crops, barks/prunings, straws, stalks, fibrous material/leaves/grass, hull/husk/dust, biomass waste material, milling industry waste, refuse/MSW, biomass chars and other biomass/misc. The created categories are also used as features during the development of the machine learning models. Therefore, we create a data set consisting of 185 samples, 21 features and one output.

In order to prepare data set to be used in machine learning methods, preprocessing of the set must be handled. Data preprocessing consists of several steps which depend on the quality of the data set. Data set we merged consists of missing values and categorical variables due to categorization. Therefore, missing values are filled with the median of the corresponding column and categorical variables are one-hot encoded into binary digits [5]. Moreover, numeric columns in the data set is linear scaled to the unit range (Eq. 1) to ensure none of the larger valued features have excessive dominance to the smaller ones and to have better convergence speed during the training phase of the models [5]:

$$\tilde{x}_i[n] = \frac{x_i[n] - \min(x_i)}{\max(x_i) - \min(x_i)} \quad (1)$$

where, $x_i[n]$ is the n^{th} sample of the i^{th} feature of the data set, $\max(x_i)$ and $\min(x_i)$ are the maximum and minimum values of the i^{th} feature, and $\tilde{x}_i[n]$ is the scaled n^{th} observation of the i^{th} feature.

2.2 Linear Regression

Linear regression is a simple statistical analysis technique which tries to demonstrate the output as a linear combination of the features with a constant value (Eq. 2). It is widely used in different disciplines due to its easy implementation and high prediction accuracy when the features and output have close to linear correlation [6]. As discussed in the introduction part, most of the studies focused to predict HHVs with using linear regression analysis. Therefore, we employ the linear regression method to create a reference to the results of other methods to show the advantages and disadvantages of each method. Least-Square approximation, i.e. normal equation is used to train the

model. Even though this approach is quite computationally expensive with larger data sets with an excessive number of samples and features, for the data set we collected, we encountered no such problem.

$$\hat{y} = \beta_0 + x_1 * \beta_1 + x_2 * \beta_2 + \dots x_n * \beta_n \quad (2)$$

where, \hat{y} is the predicted output, $x_1, x_2, \dots x_n$ are the features of the data set starting from 1 up to n, $\beta_0, \beta_1, \dots \beta_n$ are the coefficient determined in the training phase of the model.

2.3 Polynomial Regression

Polynomial regression expands the idea of linear regression into polynomial equations. Polynomial regression aims to present a relationship between output and the features with a polynomial equation. Because there is not a single type of polynomial equation, one must decide the equation according to the problem encountered. In this paper, several polynomial equations have experimented and quadratic polynomial equation selected as the best performing equation for predicting the HHVs by using both proximity and ultimate analysis (Eq. 3). One of the superior attributes of the polynomial regression compared to the linear regression is the usability of different interactions between features such as the square of a feature, or any interaction term between features can be used during the selection of the polynomial model. But, this attribute results with a possible overfitting problem where models learn the training data very well, which results in reduced prediction performance when the model tries to estimate data it has never seen before referred to as testing data [7]. This situation must be avoided to make successful prediction models with high generalization ability. In this paper, we add regularization term to the cost function (Eq. 4) to prevent the prediction model from overfitting:

$$\hat{y} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i}^n \beta_{ij} * x_i * x_j + \sum_{k=1}^n \alpha_k * x_k \quad (3)$$

$$J = \sum_{t=1}^m (y_t - \hat{y}_t)^2 + \lambda \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=i}^n \beta_{ij}^2 + \sum_{k=1}^n \alpha_k^2 \right) \quad (4)$$

where, J is the cost function, y is the actual output vector, m is the number of samples in the data set, β_{ij} and α_k are the parameters determined in the training phase, and λ is the regularization parameter.

2.4 Decision Tree Regression

Decision Tree Regression (DTR) is a type of decision tree algorithms. Unlike the basic decision tree which is used for classification problems, DTR is used for

predicting continuous type variables rather than the categorical ones. The DTR uses binary tree to recursively divide the output space into sub-sets where the distribution of output is more homogeneous in succession [8]. The algorithm then tries to minimize the prediction error in the separate parts. The same process is then applied to each new branch. Therefore, the prediction of continuous output variable is achieved by using a set of logical rules. Like many of the complex machine learning algorithms, DTR may fall into overfitting problem. In order to prevent overfitting, pruning process is implemented in the training phase of the model [9]. The greatest advantage of DTR compared to other modeling techniques is the capability of producing a model that can be represented as set of rules and logical statements. In addition, results of the decision tree model provide easy to understand information, for example importance of each feature can be understood by just looking at the presence of the interested feature in hierarchical structure of the DTR model. Also, the basic logical structure of tree is compatible to use with hardware which have low computational power.

2.5 Support Vector Regression

Support vector machines (SVM) is a widely used machine learning algorithm used in various areas of applications [10]. The popularity of the SVM is due to its optimization objective, unlike the polynomial regression and decision tree regression, SVR aims to minimize generalization error bound rather than the sum of square errors between prediction and actual outputs [11]. Therefore, during the training of SVR models, the aim to develop a model which generalizes the problem which is the desired attribute expected from a machine learning model. Support vector regression (SVR) is a special case of SVM where the aim is to predict continuous variables. In order to predict a continuous variable, we employed regularized cost function with robust ϵ -insensitive loss function (Eq. 5) which (in the best case) all outputs would be predicted with the error up to ϵ value.

$$L_\epsilon = \begin{cases} 0 & \text{if } |y - f(x)| \leq \epsilon \\ |y - f(x)| - \epsilon & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

$$J = \sum_{i=1}^n L_\epsilon(f(x_i), y) + \frac{\lambda}{2} |w|^2 \quad (6)$$

where w is the weight matrix determined during the training phase. Another reason for excessive usage of SVM technique is due to its use of kernel functions. With the help of kernel functions, features are mapped into higher vector dimension and simple linear regression is performed with the mapped features to make a prediction (Eq. 7). In this paper, linear kernel function (Eq. 8) is observed to be the kernel function with the highest prediction success.

$$f(x) = \sum_{i=1}^n a_i * K(x_i, x_j) + b \tag{7}$$

$$K(x_i, x_j) = (x_i'x_j + 1) \tag{8}$$

where $K(x_i, x_j)$ is the selected kernel function, b is the constant bias term.

2.6 K-Fold Cross Validation

K-fold cross-validation method is a technique to evaluate the performance of a method and its implementation with unbiased manner [12]. In k-fold cross-validation the data is divided into k equal sized partitions, i.e. folds, then the candidate model trained using the k-1 folds and tested on the remaining one, this process repeated k times with a different selection of test folds to ensure all of the data is used for testing purpose. Therefore, all of the data is used as both training and testing sets, and the candidate method is judged by its testing performance. This approach not only shows the prediction accuracy and usability of the candidate method, it shows the possible performance variance resulted with random splitting of the data as the model is trained and tested with different folds, this attribute of the k-fold cross validation shows the true and unbiased prediction accuracy and generalization performance of a method which is not possible with traditional train – test splitting. In the present paper, we chose 10 as the ‘k’ number because it has been observed that 10-fold cross validation provides the most unbiased performance evaluation [13].

III. RESULTS AND DISCUSSION

The proposed machine learning methods are implemented in MATLAB 2018a environment. As a goal of the present paper, ultimate analysis and proximity analysis features are used individually, and one-hot encoded variables are used mutually to predict the HHVs. Which results with, 18 features and 16 features are used for predicting HHVs by using proximity analysis and ultimate analysis data, respectively. Testing performance of k-fold cross-validation technique is concerned during the evaluation of the methods and correlation coefficient (R^2), Adj. R^2 , root-mean-square-error (RMSE), and root-mean-square-logarithmic-error (RMSLE) metrics are employed to evaluate the prediction performance of the proposed methods. Results are given in Table 1 and Table 2. Moreover, in order to investigate each method’s advantages and disadvantages, actual output values versus predictions graphs are plotted in Figure 1 and Figure 2.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^m (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y})^2} \tag{9}$$

$$Adj. R^2 = 1 - \frac{[(1 - R^2) * (m - 1)]}{m - n - 1} \tag{10}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (y_i - \hat{y}_i)^2}{m}} \tag{11}$$

$$RMSLE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m [\log(y_i + 1) - \log(\hat{y}_i + 1)]^2}{m}} \tag{12}$$

Table 1. Performance evaluation for predicting HHVs by using proximity analysis and categorical variables

	Linear Regression	Polynomial Regression	Decision Tree Regression	Support Vector Regression
R²	0.64	0.84	0.78	0.84
Adj.R²	0.57	0.81	0.74	0.81
RMSE	3.465	2.275	2.701	2.276
RMSLE	0.167	0.115	0.133	0.123

Table 2. Performance evaluation for predicting HHVs by using ultimate analysis and categorical variables

	Linear Regression	Polynomial Regression	Decision Tree Regression	Support Vector Regression
R²	0.75	0.76	0.76	0.77
Adj.R²	0.73	0.75	0.74	0.75
RMSE	3.137	2.957	3.065	2.896
RMSLE	0.209	0.197	0.213	0.188

When Table 1 is examined, it is obvious that linear regression was not able to make good predictions of HHVs using proximity analysis compared to other methods, even though it is excessively used in previous studies in the literature for the same problem. One of the primary reasons for this behavior is the limitations of a linear line where the linear regression tries to fit to the data. It can be concluded that only a linear line is not enough to make highly accurate predictions for such a problem. For the case of decision tree regression method, although its prediction accuracy was higher than the linear regression method, it is still worse than the remaining two methods. Due to the binary splitting structure of the tree it is not a surprise that the decision tree can’t perform as good as in regression as it does at classification problems [14]. On the other hand, polynomial regression and support vector regression performed very similar and better than the rest of the methods. For polynomial

regression, one can see that the quadratic representation of the features is superior to the simple linear form and it can be used for predicting the HHVs using proximity analysis. SVR had almost identical performance to the polynomial regression, but the best performing and selected kernel was the linear kernel, this selection of kernel is not greatly optimal, because we get the most benefit from selection more complex kernel functions for to be used in SVR. Moreover, when the computational complexity of the SVR is concerned, polynomial regression may be a better choice for predicting HHVs from proximity analysis.

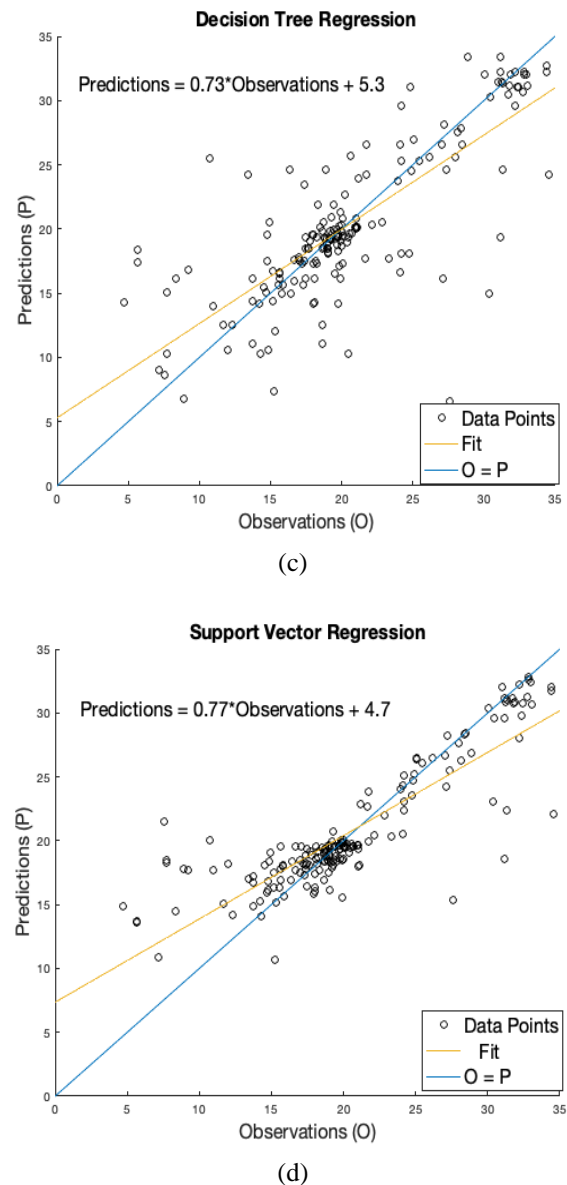
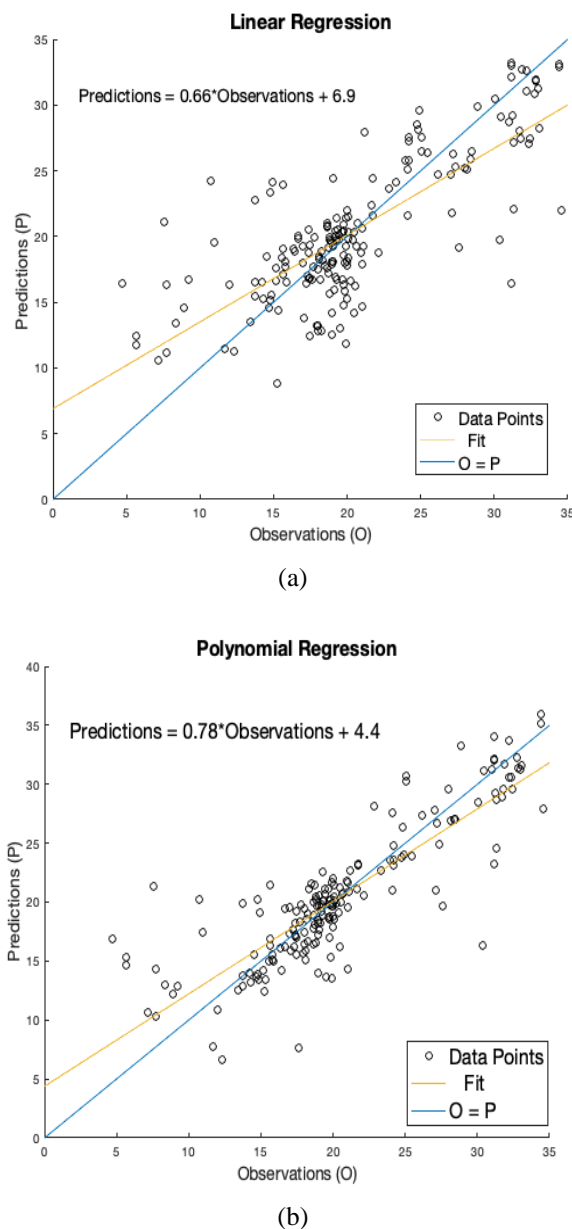


Figure 1. Predictions vs observations graph for all methods using proximity analysis

For the prediction of HHVs from ultimate analysis data, as one can see that from Table 2, all of the methods performed almost identical. The only reason for this behavior is ultimate analysis and HHVs have a linear correlation to some degree, which explains why the linear regression performed as same as the other methods. Even though ultimate analysis of material requires an advanced laboratory, if one was able to perform the analysis, it is logical to use linear regression to make accurate predictions for HHVs due to its low computational cost and easiness of the implementation. One can say that other and more advanced methods proposed in this paper is not required and can be a waste of computational resources for such a problem.

Furthermore, one can analyze Figure 1 to have a deeper understanding of each model's ability to predict HHVs using proximity analysis. Linear regression was able to

predict just a few of the data points correctly which justifies the unsatisfied results given in Table 1. For the case of decision tree regression, some of the data points were predicted with almost perfect accuracy, but other points were extremely irrelevant. This is due to the nature of the decision tree regression as it uses a strict set of rules, but one must note that with a higher number of samples decision tree regression may perform better. For SVR and polynomial regression, the results are similar and with the exception of a few outlier data points, predictions were close to the observations and have a reasonable distribution.

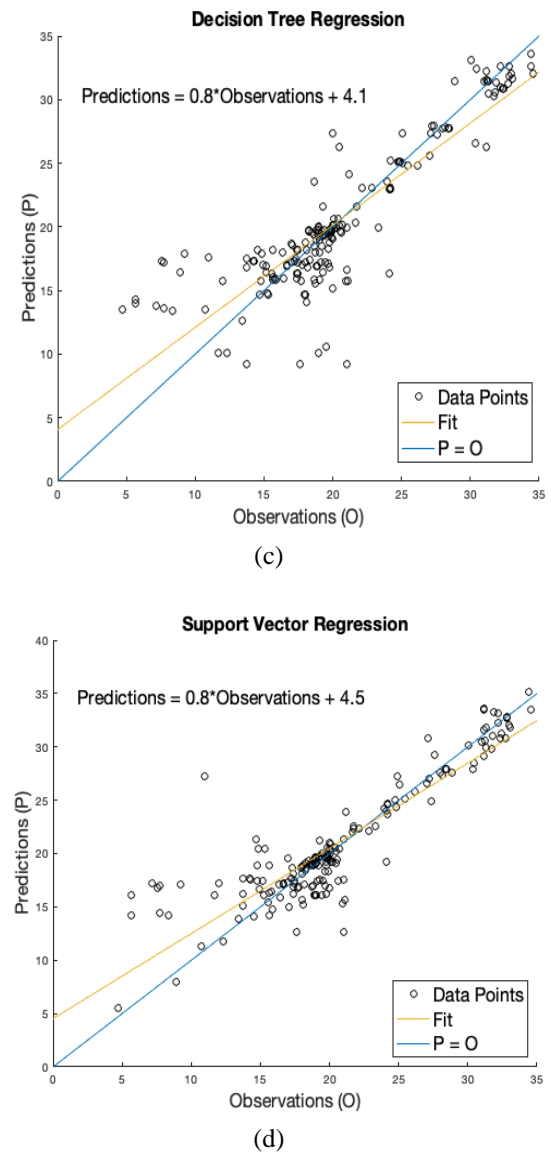
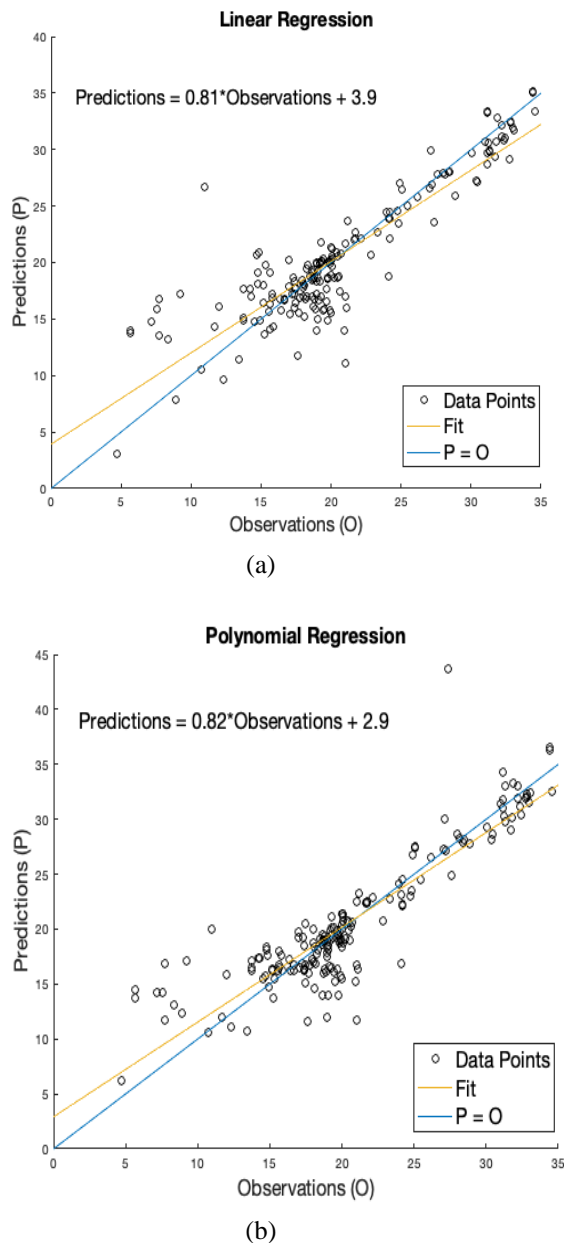


Figure 2. Predictions vs observations graph for all methods using ultimate analysis

In Figure 2, it is obvious that almost all of the methods made high accuracy predictions with exception of few outlier data, and some of the same outlier data points were predicted with large error margin with all methods, one can conclude that those points don't follow the same pattern, don't contain true information for the dynamics of the system and can be ignored, one must note that these outliers may occur due to the handling of the missing data discussed in section 2.1. After all, as a simple statistical analysis technique, linear regression can perform as well as the other methods and it is enough to show the relationship between ultimate analysis and HHVs.

Also, one must note that among each proposed method, SVR is the most computationally complex algorithm due to its hyperplane solution to given regression problems as explained in Section 2.5. On the other hand, linear regression and polynomial regression tends to have similar computational complexity

because they solve single optimization problem throughout their training. Decision tree lays between these methods from the computational requirement perspective and it predict using entropy-based structure as explained in Section 2.4.

IV. CONCLUSION

In this paper, we collected and merged a data set contains proximity and ultimate analysis of various type of materials and their corresponding HHVs. Furthermore, 4 different machine learning methods are employed and used to predict HHVs using proximity and ultimate analysis separately as well as using categorical information of the materials. For the case of using proximity analysis to predict HHVs, the performance of the linear regression is inadequate as a contrary to its wide usage in literature. Polynomial regression and SVR had similar results and due to simpler implementation and computational requirement, one can prefer to use polynomial regression for such problem. Decision tree regression performed better than linear regression but fell short compared to SVR and polynomial regression. But this situation may differ if one can see a larger data set with more number of samples. For predicting the HHVs from the ultimate analysis, all of the proposed methods made predictions with high accuracy and in a similar fashion. Due to high performance in linear regression, one can say that ultimate analysis and HHV have a high linear correlation. Therefore, advanced machine learning methods are not required for such problem and one can employ simple statistical analysis techniques. As the best performing method, polynomial regression managed to predict HHV value from both proximity and ultimate analysis results among other methods by reaching $R^2 = 78$ and $R^2 = 82$, respectively. For future work, we'll focus on applying a greater number of methods as well as using a larger data set, also other than predicting the HHVs, we aimed to predict ultimate analysis using the proximity analysis with various type of machine learning based modeling methods. We believe that machine learning can help researchers to make highly accurate models of HHV by using proximity and ultimate analysis of the materials.

REFERENCES

- [1] Selvig WA, G. I., "Calorific value of coal," *Chem. coal Util.*, vol. 1, p. 139, 1945.
- [2] Strache H, L. R., "Kohlenchemie," *Akad. Verlagsgesellschaft*, p. 476, 1924.
- [3] Hosokai, S., Matsuoka, K., Kuramoto, K., and Suzuki, Y., "Modification of Dulong's formula to estimate heating value of gas, liquid and solid fuels," *Fuel Process. Technol.*, vol. 152, pp. 399–405, 2016.
- [4] Rd, M. and Md, H., "Mass-fraction of oxygen as a predictor of HHV of gaseous, liquid and solid fuels," *Energy Procedia*, vol. 142, pp. 4124–4130, 2017.
- [5] Matin, S. S. and Chelgani, S. C., "Estimation of coal gross calorific value based on various analyses by random forest method," *Fuel*, vol. 177, pp. 274–278, 2016.
- [6] Channiwala SA and Parikh PP., "A unified correlation for estimating HHV of solid, liquid and gaseous fuels.," *Fuel*, vol. 81, pp. 1051–63, 2002.
- [7] Ng, A. Y., "Preventing Overfitting of Cross-Validation Data," in *ICML '97 Proceedings of the Fourteenth International Conference on Machine Learning*, 1997, pp. 245–253.
- [8] Podgorelec, V. and Zorman, M., "Decision Tree Learning," *Encycl. Complex. Syst. Sci.*, pp. 1–28, 2015.
- [9] Bertsimas, D. and Dunn, J., "Optimal classification trees," *Mach. Learn.*, vol. 106, no. 7, pp. 1039–1082, 2017.
- [10] Chih-Wei Hsu, Chih-Chung Chang, and C.-J. L., "A Practical Guide to Support Vector Classification," *BJU Int.*, vol. 101, no. 1, pp. 1396–1400, 2008.
- [11] Noble, W. S., "What is a support vector machine?," *Nat. Biotechnol.*, vol. 24, no. 12, pp. 1565–1567, 2006.
- [12] Elmaz, F., Yücel, Ö., and Mutlu, A. Y., "Evaluating the Effect of Blending Ratio on the Co-Gasification of High Ash Coal and Biomass in a Fluidized Bed Gasifier Using Machine Learning," *Mugla J. Sci. Technol.*, vol. 5, no. 1, pp. 1–15, Jun. 2019.
- [13] Mutlu, A. Y. and Yucel, O., "An artificial intelligence based approach to predicting syngas composition for downdraft biomass gasification," *Energy*, vol. 165, pp. 895–901, Dec. 2018.
- [14] Xu, M., Watanachaturaporn, P., Varshney, P. K., and Arora, M. K., "Decision tree regression for soft classification of remote sensing data," *Remote Sens. Environ.*, vol. 97, no. 3, pp. 322–336, 2005.

Elektrikli Taşıtlarda Kullanılan İndüksiyon / Sabit Mıknatıslı Motor Sürücülerinin Simülasyonu ve Motor Dinamiklerinin Analizi

Simulation of Induction / Permanent Magnet Motor Drives Used in Electric Vehicles and Analysis of Motor Dynamics

Koray Yılmaz KAYA^{1,2} , İsmail KIYAK³ 

¹ Akın Metal ARGE Merkezi, 34956, İstanbul, Türkiye

² Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Entitüsü, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, 34722, İstanbul, Türkiye

³ Marmara Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, 34722, İstanbul, Türkiye

Öz

Bu makalede, elektrikli araçlarda kullanılan motor çeşitlerinden sincap kafesli indüksiyon motor ve sabit mıknatıslı senkron motorun yapısal özellikleri ve hız dinamikleri karşılaştırılmıştır. Karşılaştırılmanın doğru yapılabilmesi için aynı tork altında benzer parametrelere sahip motorlar, alan odaklı kontrol (FOC) yöntemi ile sürülmüştür. Motorların hızlanma ve yavaşlama esnasında geçici hal durumları simülasyon ortamında inceleme ve karşılaştırılmıştır. Sonuçlar göstermektedir ki indüksiyon motorları hız değişimlerine daha çabuk tepki gösterirken, sabit mıknatıslı motorlar daha geç tepki vermektedir. Bunun yanında sabit mıknatıslı motorların tork gerektiren kalkış anlarında daha iyi performans gösterdiği anlaşılmıştır. Simülasyon PSIM programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Simülasyonda kullanılan motor sürücülerin anahtarlama frekansı, giriş gerilimleri vb. parametreler aynı seçilmiştir.

Anahtar Kelimeler: İndüksiyon Motor ile Sabit Mıknatıslı Senkron Motorun performans karşılaştırması, PSIM, FOC kontrol yöntemi.

Abstract

In this paper, structural characteristics and speed dynamics of squirrel cage induction motor and permanent magnet synchronous motor, used in electric vehicles are compared. The motors with similar parameters under the same torque have been driven by the field oriented control (FOC) method in order to ensure correct comparison. Transient conditions of the motors during acceleration and deceleration were examined and compared in simulation. The results show that the induction motors react more quickly to the speed changes, whereas the permanent magnet motors react more late. In addition, it is understood that permanent magnet motors perform better during torque-demanding moments. Simulation was performed via PSIM program. The parameters such as switching frequency, input voltage were selected the same in motor driver simulations.

Keywords: Performance comparison of Induction Motor and Permanent Magnet Synchronous Motor, PSIM, FOC control method.

I. GİRİŞ

İlk elektrikli taşıt 19. Yüzyıl başlarında icat edilmiştir. Fakat bu yıllardaki motor, elektronik ve batarya teknolojisi yeterince gelişmemiş olması, taşıtların menziline oldukça kısaltmıştır. Bununla birlikte ham petrolün keşfi ile içten yanmalı motorlar aktif hale gelmiştir ve bu taşıtlar hem ucuz hem de daha verimli olarak tasarlanabilmiştir. 20. Yüzyılın ortalarından itibaren fosil yakıtlı araçların egzoz emisyon sorunu yüzünden elektrikli araçlar tekrar gündeme gelmiş ve bu taşıtlar üzerine günümüze kadar birçok yeni tasarım yapılmıştır.

Günümüzde ise batarya, elektronik ve motor teknolojilerinin gelişmesi sayesinde elektrikli taşıtlar tekrar popüler olmuştur. Özellikle motor teknolojisinin gelişimi sayesinde elektrikli taşıtların ilk icat edildiği yıllarda kullanılan

DC motorların yanında artık birden farklı teknolojiye sahip AC motorlarda kullanılmaya başlanmıştır. Sabit mıknatıslı motorlar, indüksiyon motorlar ve relüktans motorları bunlara örnek olarak gösterilebilir.

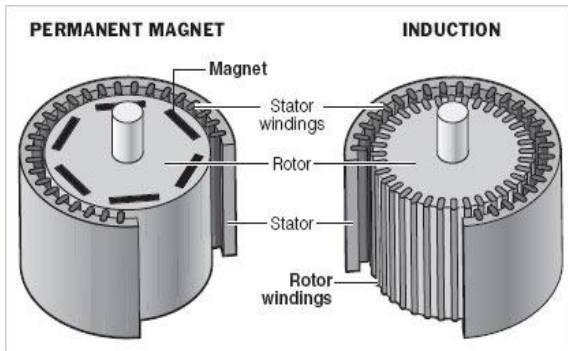
Elektrikli taşıtlarda sık sık sabit mıknatıslı (PM) ve indüksiyon motorlar(IM) kullanılmaktadır (Zhu & Howe, 2007), (Chau, Chan, & Liu, 2008), (Buyukdegirmenci, Bazzi, & Krein, 2014). İndüksiyon motorlar, sürücülerinin arıza durumunda doğal olarak uyarılmamış olduklarından taşıt üreticileri tarafından güvenli bulunmakta iken sabit mıknatıslı motorlar ise yüksek tork yoğunlukları ve verimleri sayesinde indüksiyon motorlara göre daha iyi özelliklere sahip motorlar olarak kabul edilmektedir (Pellegrino, Vagati, Boazzo, & Guglielmi, 2012), (Chau, 2016). Sabit mıknatıs motorları arasında, hem yüzeye monte PM (SPM) hem de iç PM (IPM) tipleri çekiş için uyarlanmıştır (El-Refae & Jahns, 2008). Çekiş için uyarılan SPM motorlar, konsantr stator sargılarına, çok kısa sargı uç bağlantılarına ve kolay stator yapısına sahiptirler (El-Refae & Jahns, 2005).

Bu makalede, sabit mıknatıslı motor ile indüksiyon motor arasında karşılaştırma yapılmış ve her iki motorun PSIM simülasyon programında sabit torktaki hız tepkileri karşılaştırılmıştır. PSIM, özellikle elektrikli sürücüler ve güç elektroniği için tasarlanmış bir simülasyon yazılımıdır ve araştırma amaçlı yapılan çalışmalarda etkili olduğu kanıtlanmıştır (Kristiansen & Steinsland, 2018).

II. SABİT MIKNATISLI MOTOR İLE İNDÜKSİYON MOTORUN KARŞILAŞTIRMASI

2.1 Mimari Olarak Karşılaştırma

Elektrikli araçlarda sıkça tercih edilen iki motor türü olan sabit mıknatıslı senkron motorun ve sincap kafesli indüksiyon motorun mimari yapıları Şekil 1'de gösterildiği gibidir.



Şekil 1. İndüksiyon motoru ve sabit mıknatıslı motorun mimari olarak karşılaştırılması (Westenhaus, 2010).

Sabit mıknatıslı motorun rotor kısmına özel bir materyalden yapılmış olan doğal olarak kuvvetli akıya sahip mıknatıslar yerleştirilmiştir. Mıknatıs materyali olarak önceleri sertleştirilmiş çelik kullanılırken son zamanlarda alüminyum nikel ve kobalt alaşımları (ALNICO), stronsiyum ferrit veya baryum ferrit (Ferrit), samaryum kobaltı (ilk nesil nadir toprak mıknatısı) (SmCo) ve neodim demir-bor (ikinci nesil nadir toprak mıknatısı) (NdFeB) geliştirilmiş ve kullanılmıştır (Kiran, Nair, & Lakshmi, 2016). Bu mıknatıslar sayesinde statoru uyarılmış bir Sabit Mıknatıslı motor senkron olarak çalıştırılabilmektedir. Ayrıca bu motorların tork uygulamalarında öne çıkmasının sebebi de özel mıknatıslara sahip olmasıdır. Sabit mıknatıslı motorlar tork uygulamalarında indüksiyon motorlarına karşı güçlü bir rakiptir (Hashemnia & Asaei, 2008). Son yıllarda bu motorlar elektrikli taşıtlarda çekiş uygulamalarında istenen motor türü olmuştur (Zhang, Cao, & Morrow, 2015), (Bâltaşan & Florea, 2013).

İndüksiyon motorunda ise rotor kısmı da sargılardan oluştuğundan dolayı stator sargıları uyarıldığında rotor sargıları gerilim endüklemiş olur. Bundan dolayı indüksiyon motorlarındaki rotor stator döner alanını bir miktar kayma ile asenkron olarak takip eder. İndüksiyon motorlarında mıknatıs yoktur ve güçlü bir yapıdadır. Bu motorların stator ve rotor kısımlarının her ikisi de ısındığından dolayı soğutmaya ihtiyaç duyması motorun özelliklerini sınırlamaktadır (Yang, Shang, Brown, & Krishnamurthy, 2015). İndüksiyon motorun ana avantajları ise basit mimarisi, kolay bakımı, düşük kurulum maliyeti ve yüksek güvenilirliktir (Qinghua, 2005).

2.2. Motor Performans Karşılaştırması

Endüksiyon motoru ile Sabit mıknatıslı motor performans değerlendirmesi olarak hız, verimlilik, güvenilirlik, güç yoğunluğu, doğruluk ve maliyet olarak karşılaştırılmıştır (Murphy, 2012).

2.2.1 Hız

PMSM'lar servo motor ve indüksiyon motor hızlarına yaklaşık olarak ulaşabilmektedirler. İndüksiyon motorların kullanım hız aralıkları ise PMSM motorlara göre daha azdır.

2.2.2 Verimlilik

PMSM motorlar sabit mıknatısları sayesinde soğuk çalışabilirler. Dolayısıyla verimleri yüksektir. İndüksiyon motorları ise rotoru sargılı olduğundan dolayı çalışma esnasında ısınma problemleri yaşar ve bundan dolayı verimleri düşüktür.

2.2.3 Güvenilirlik

İndüksiyon motorlarda özellikle sargılardaki yüksek sıcaklık nedeniyle sargı izolasyonları zamanla yıpranır ve bu motorun tahrip olmasına sebep olur. PMSM'larda ise düşük çalışma sıcaklıkları sayesinde

sargılardaki izolasyon çok uzun süre bozulmadığından motor ömürleri uzun olur.

2.2.4 Güç yoğunluğu

İndüksiyon motorlarında sincap kafesli rotor mimarisinden dolayı doğal olarak güç yoğunluğu sınırlanmış olur. Bu sebepten dolayı indüksiyon motorlar tork uygulamalarından ziyade hız uygulamalarında daha çok tercih edilir. Sabit mıknatıslı motorlar ise mıknatısların doğal bir akıya sahip olmaları sayesinde güç yoğunluğu oldukça fazladır. Bu motorlarda yüksek torklara elde edilebilir.

2.2.5 Doğruluk

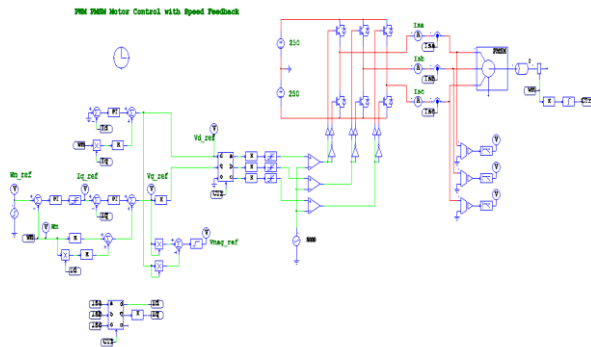
Endüksiyon motorlarda, FOC (Field Oriented Control) ve Vektör kontrollü sayesinde doğruluk sağlanırken, sabit mıknatıslı motorlarda harici geri besleme olmadan motorun tam doğruluğunu bulmak ve konumlandırmak zor olabilir.

2.2.6 Maliyet

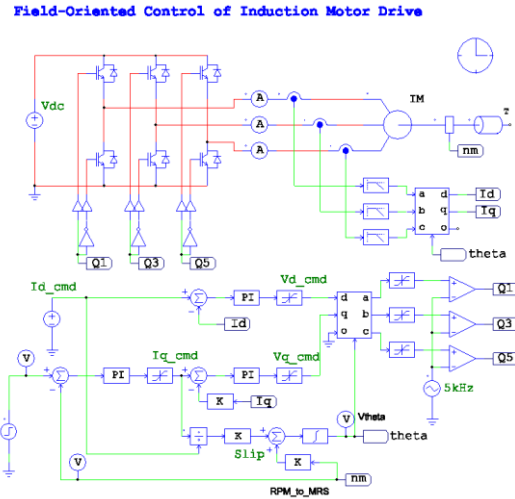
Endüksiyon motorlarda kurulum maliyeti normal düzeyde iken, işletim maliyeti ısınma problemleri yüzünden yüksektir. Sabit mıknatıslı motorlarda ise mıknatıs maliyetlerinden dolayı kurulum maliyeti yüksektir. Fakat mıknatısların verimli olması ve motorun uzun ömürlü olması sayesinde işletme maliyetleri düşüktür.

III. SİMÜLASYONLARIN İNCELENMESİ

Bu çalışmada indüksiyon motorları ve sabit mıknatıslı motorların aynı torktaki hız değişimlerine verdiği tepkiler simülasyon ortamında incelenmiştir. Simülasyon programı olarak PSIM kullanılmıştır. Sabit mıknatıslı senkron motor "Hız Geri Beslemeli PWM Kontrol" yöntemi ile Şekil 2 'de gösterildiği gibi sürülmüştür. İndüksiyon motoru ise " Alan Odaklı Kontrol (Field Oriented Control)" yöntemi ile Şekil 3 'te gösterildiği sürülmüştür. Simülasyonların daha rahat anlaşılması için " Alan Odaklı Kontrol (Field Oriented Control)" yöntemi ayrıntılı olarak incelenmiştir.

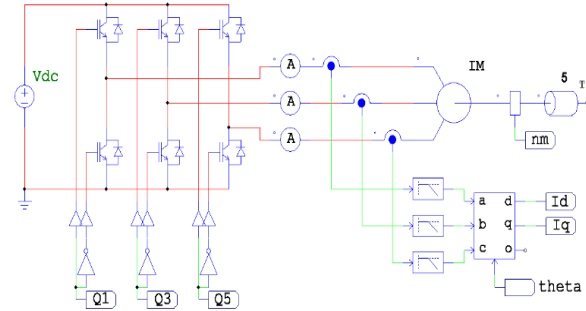


Şekil 2. PMSM 'un hız geri beslemesi ile PWM kontrolü simülasyon şeması



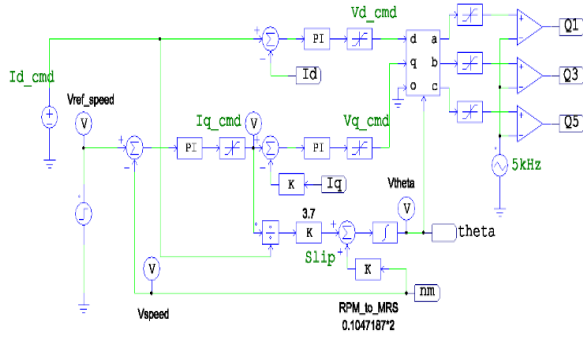
Şekil 3. FOC yöntemi ile sürülen indüksiyon motor sürücüsünün simülasyon şeması.

Bu simülasyonda, s-domeninde bir endüksiyon motorunun alan odaklı kontrolü uygulanmaktadır ("Field Oriented Control of Induction Motor Drive, "). Alan odaklı kontrol yöntemi (FOC) temel olarak AC bir motorun DC motor eşleniğine çevirerek sanki DC motor kontrol yapılmış gibi kontrol edilebilmesi olarak tanımlanır. Bu yöntemde ilk olarak çıkış akımlarının örnekleri Şekil 4 'te gösterildiği üzere alınır ve Clarke- Park dönüşümlerini bir arada gerçekleştiren araca verilir. Burada dönüşüm formüllerinde kullanılan Theta açısı da aynı araca verilir. Böylece çıkış akımlarının Id ve Iq olarak elde edilir.



Şekil 4. İndüksiyon motor sürücüsünün simülasyonu çıkış akım örneklemesi

Clarke-Park dönüşümleri sonucunda elde edilen Id ve Iq akımları Şekil 5'te gösterilen geri besleme ve kontrol döngüsüne kullanılmaktadır. Burada hız kontrolü Iq akımı üzerinden kontrol edilir. Sabit tork olan bu sistemde Id akımı ile aktif işlem yapılmaz. Akıma sadece belirli bir referans ile karşılaştırılması gerçekleştirilerek PI uygulanır. Ayrıca Id akımı Theta açısının hesaplanmasında da kullanılmaktadır.



Şekil 5. İndüksiyon motor sürücüsünün simülasyonu geri besleme kontrol döngüsü

Hız kontrolünün sağlanması için Theta açısının hesaplanması gerekir. Bu açı hesaplanırken şu yollar izlenir:

Motorun milinden RPM olarak okunan hız bilgisi açısal hızı (Rad/s) çevrilir. Bu dönüşüm işlemi aşağıdaki gibidir.

$$\text{Açısal hız} = (\text{rpm} * p * 2\pi) / 60 \quad (1)$$

Formülde kullanılan “p” çift kutup sayısıdır.

Hız referansı ile hız arasındaki fark alınarak hata elde edilir. Bu hata PI aracından geçiril ve Id değerine bölünür.

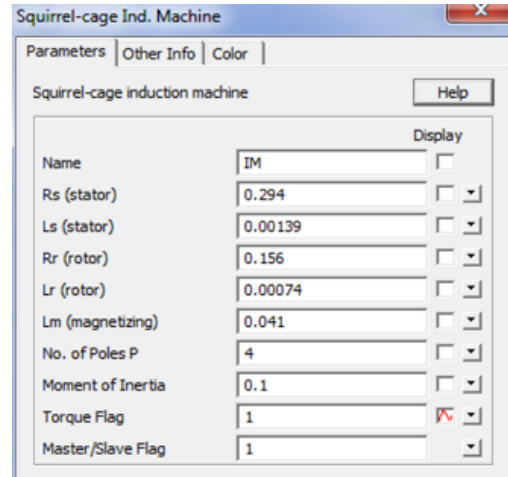
Elde edilen sonuç “Rotor Zaman Sabiti” ile çarpılarak daha evvelden elde edilen açısal hız ile toplanır. Rotor zaman sabiti formülü aşağıdaki gibidir:

$$\text{Rotor Zaman Sabiti} = R_r / (L_m + L_r) \quad (2)$$

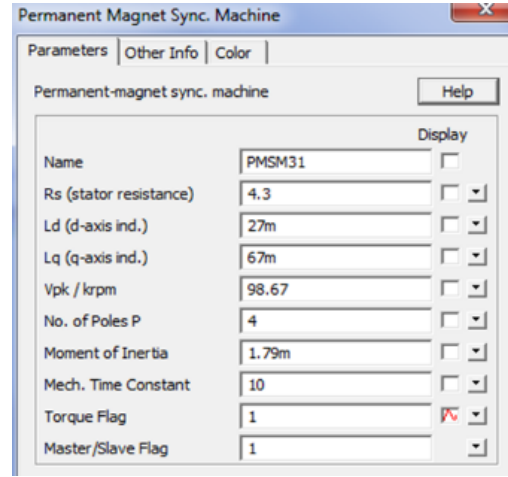
Burada R_r rotor sargı direncini, L_m motor manyetik endüktansını, L_r rotor sargılarının kaçak endüktansını göstermektedir.

Böylece Theta açısı elde edilmiş olur.

I_q akımı elde edilen hız hatası ile toplanarak I_d akımı ile Park-Clarke dönüşümüne koyulur. Yukarıda elde edilen Theta açısı da aynı dönüşüm aracına verilerek I_a , I_b ve I_c akımları elde edilir. Elde edilen faz akımlarının her biri ayrı bir amplifikatörde 5 kHz ‘lik testere dişi dalga ile karşılaştırılarak inverter kontrol sinyalleri elde edilir. Buradaki 5 kHz ‘lik testere dişi dalga inverterin anahtarlama frekansındır. Elde edilen kontrol sinyalleri üst kollardaki IGBT ‘lere ve ters dalga şekilleri alt kol IGBT ‘lere verilerek kontrol sağlanmış olur. Simülasyon olduğundan dolayı kontrol sinyallerindeki ölü zaman otomatik olarak ayarlanır. Her iki simülasyondaki motor değerleri sırasıyla Şekil 6 ‘da ve her iki simülasyonun karşılaştırılabilmesi için çalıştırma parametreleri Tablo 1’de gösterilmiştir.



(a)



(b)

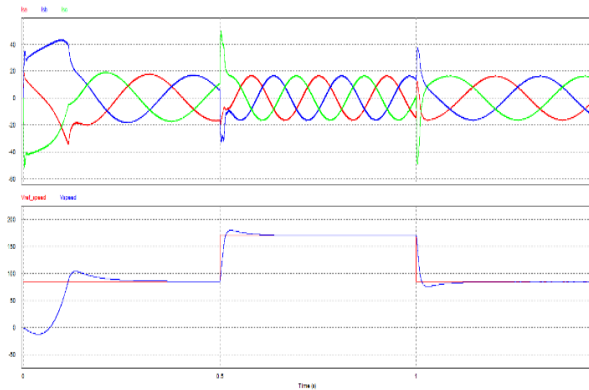
Şekil 6. Sabit mıknatıslı motor ve indüksiyon motor parametreleri

Tablo 1. Simülasyon parametreleri

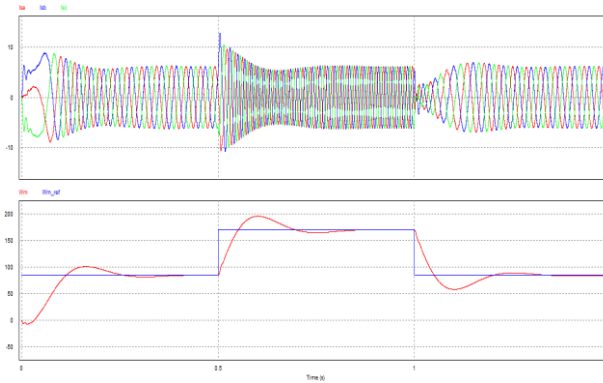
Parametre İsmi	Parametre Değeri
Anahtarlama frekansı	5 kHz
Yüklenme torku	5 N/m
Başlangıç hız değeri	85 rpm
İkinci hız değeri	170 rpm
Üçüncü hız değeri	85 rpm
Giriş gerilimi	500 V _{dc}

IV. SİMÜLASYON SONUÇLARI

PSIM simülasyon programında her iki motor için aynı tork değerinde hızlar Tablo 1 'deki değerlere göre değiştirilecek çalıştırılmıştır. Her iki motorun aynı şartlar altında hız değişikliklerine verdikleri tepki gözlemlenmiştir. Şekil 7'de FOC kontrolündeki indüksiyon motorunun faz akımları, referans hızı ve gerçek hızı verilmiştir.



Şekil 7. FOC kontrolündeki indüksiyon motorunun faz akımları, referans hızı ve gerçek hızı dalga şekilleri



Şekil 8. PWM kontrolündeki PMSM faz akımları, referans hızı ve gerçek hızı dalga şekilleri

Her iki motorun sabit tork altında hız değişimlerinin dalga şekilleri incelendiğinde başlangıçtaki ilk kalkış anındaki torku sabit mıknatıslı senkron motorun 32 ms yendiği gözlemlenirken indüksiyon motoru 68 ms 'de yendiği gözlenmektedir. Yani Sabit mıknatıslı motor kalkış torkunu indüksiyon motora göre yaklaşık iki kat daha hızlı yenmektedir.

Motorların hız değişimi incelendiğinde sabit mıknatıslı motor, hız değişimi esnasında yeni hız değerine oturması yaklaşık 350 ms almaktadır. Bu süre indüksiyon motorunda 140 ms 'dir. Yani indüksiyon motoru hız değişimlerine sabit mıknatıslı motorlara göre daha hızlı adapte olabilmektedir.

Motorların hız geçişleri esnasında istedikleri akımlar karşılaştırıldığında indüksiyon motoru nominal çalışması pik akımı 16A iken 170 rpm hıza çıkış esnasında kısa süreli olsa 50A akım istemektedir. Sabit mıknatıslı motor nominal pik akımı 6.2A iken hız geçişi esnasında maksimum 12.8 A istemektedir. İndüksiyon motorlarının bu şartlar altında daha kuvvetli bir sürücüye ihtiyacı olmaktadır.

Bu sonuçlar indüksiyon motorunun hız istenen yerlerde daha etkili olduğu ve sabit mıknatıslı motorlarında daha çok tork istenen uygulamalarda etkili olduğu ispatlanmış olmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] Bălăţanu, A., & Florea, L. M. (2013). *Comparison of electric motors used for electric vehicles propulsion*. Paper presented at the Proceeding of International Conference of Scientific Paper AFASES.
- [2] Büyükdeğirmenci, V. T., Bazzi, A. M., & Krein, P. T. (2014). Evaluation of induction and permanent-magnet synchronous machines using drive-cycle energy and loss minimization in traction applications. *IEEE Transactions on industry applications*, 50(1), 395-403.
- [3] Chau, K. (2016). *Overview of Electric Vehicle Machines-From Tesla to Tesla, and Beyond*. Paper presented at the 2016 International Conference of Asian Union of Magnetics Societies (ICAUMS).
- [4] Chau, K., Chan, C. C., & Liu, C. (2008). Overview of permanent-magnet brushless drives for electric and hybrid electric vehicles. *IEEE Transactions on industrial electronics*, 55(6), 2246-2257.
- [5] El-Refai, A. M., & Jahns, T. M. (2005). Optimal flux weakening in surface PM machines using fractional-slot concentrated windings. *IEEE Transactions on industry applications*, 41(3), 790-800.
- [6] El-Refai, A. M., & Jahns, T. M. (2008). Comparison of synchronous PM machine types for wide constant-power speed range operation. *COMPEL-The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering*, 27(5), 967-984.
- [7] Field Oriented Control of Induction Motor Drive. Retrieved from <https://powersimtech.com/applications/induction-motor-field-oriented-control/>
- [8] Hashemnia, N., & Asaei, B. (2008). Comparative study of using different electric motors in the electric vehicles. *Electrical Machines, 2008. ICM 2008. 18th International Conference on*, 1-5.
- [9] Kiran, I., Nair, A., & Lakshmi, S. (2016). Permanent Magnet Synchronous Motor Control with Speed Feedback Using a Resolver. 3(4).

- [10] Kristiansen, K., & Steinsland, K. E. (2018). *PSIM-Based Hardware and Software Design of an Inverter-Fed Permanent Magnet Synchronous Motor*. University of Agder.
- [11] Murphy, J. What's the Difference Between AC Induction, Permanent Magnet, and Servomotor Technologies? Retrieved from <https://www.machinedesign.com/motorsdrives/whats-difference-between-ac-induction-permanent-magnet-and-servomotor-technologies>. (2012).
- [12] Pellegrino, G., Vagati, A., Boazzo, B., & Guglielmi, P. (2012). Comparison of induction and PM synchronous motor drives for EV application including design examples. *IEEE Transactions on industry applications*, 48(6), 2322-2332.
- [13] Qinghua, L. (2005). *Analysis, design and control of permanent magnet synchronous motors for wide-speed operation*. National University of Singapore.
- [14] Westenhaus, B. The Best Electric Vehicle Motor. Retrieved from <https://newenergyandfuel.com/http://newenergyandfuel.com/2010/02/09/the-best-electric-vehicle-motor/>(2010).
- [15] Yang, Z., Shang, F., Brown, I. P., & Krishnamurthy, M. (2015). Comparative study of interior permanent magnet, induction, and switched reluctance motor drives for EV and HEV applications. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 1(3), 245-254.
- [16] Zhang, Y., Cao, W. P., & Morrow, J. (2015). Interior permanent magnet motor parameter and torque ripple analysis for EV traction. *Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices (ASEMD), 2015 IEEE International Conference on*, 386-387.
- [17] Zhu, Z.-Q., & Howe, D. (2007). Electrical machines and drives for electric, hybrid, and fuel cell vehicles. *Proceedings of the IEEE*, 95(4), 746-765.

Taşıtlarda Katlanabilir Koltuk Sistemleri için Selonoid Aktüatör Tasarımı

Design and Analysis of Solenoid Actuator for Vehicle Foldable Seat Structure

Uğur DEMİR¹ 

1Ar-Ge Merkezi, Coşkunöz Holding A.Ş., 16310, Bursa, Türkiye

Öz

Bu çalışmada motorlu araçlar için koltuk kilidi aktüatörleri ele alınmıştır. Genel olarak koltuk kilitleri, elektrikli ve mekanik olarak tahrik edilen iki modelden oluşurlar. Bu çalışmada elektrikli koltuk kilitleri üzerine odaklanılmıştır. Elektrikli koltuk kilitlerinde tahrik sistemleri için elektrik motorlu ve selonoid aktüatörlü olmak üzere iki yöntem mevcuttur. Dahası birçok uygulamada koltuk kilidini tahrik etmek için elektrik motorlarının selonoidlere göre daha fazla kullanıldığı görülmüştür. Koltuk kilidini tahrik etmek için elektrik motoru ve selonoid aktüatör modelleri incelenmiştir. Elektrikli koltuk kilidi için elektrikselsel ve mekanik tasarım gereksinimleri, otomotiv ana sanayi şartnameleri ve yasal regülasyonlar üzerinden ele alınmıştır. Elektrikli koltuk kilidi için mekanik gereksinimler, elektrik motoru ve selonoid aktüatör modellerinde benzerdir. Diğer taraftan, Elektrikli koltuk kilidi için elektrikselsel gereksinimler, elektrik motoru ve selonoid aktüatör arasında birçok farklılık göstermektedir. Elektrikli koltuk kilidi için sınır şartlar ve tasarım ile test kriterleri düşünüldüğünde, tahrik yönteminde selonoid aktüatör kullanımı, maliyet ve tasarım konuları açısından elektrik motoruna göre birçok avantaj sağlamaktadır. Elektrikli bir koltuk kilit mekanizmasının fonksiyonunu yerine getirebilmesi için gerekli olan tahrik kuvveti ve deplasmanı müşteri şartnameleri incelenerek tayin edilmiştir. Bu çalışmada, Ansys Maxwell ortamında, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak, selonoid'in tasarım kriterlerinde belirlenen bir süre dahilinde taşıyıcı hareket kolunun deplasmanı ve uyguladığı kuvvet analiz edilmeye çalışılmıştır. Analiz çalışmalarında Taguchi'nin deney tasarımı yöntemi kullanılarak kritik tasarım parametrelerinin belirlenmesinin ardından, ihtiyaç duyulan tasarım kriterlerini sağlayabilmesi için uygun tasarım modeli seçilerek çalışma tamamlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Aktüatör; sonlu elemanlar yöntemi; elektromekanik aktüatör; elektrikli koltuk kilidi; selonoid aktüatör, deney tasarımı

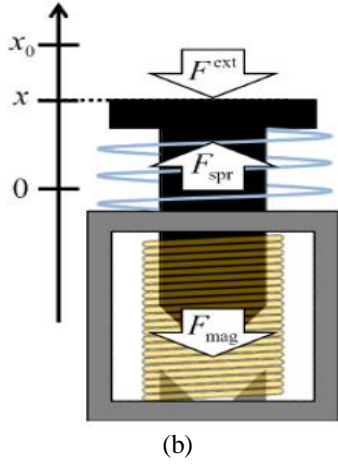
Abstract

This study presents the seat latch actuators for the vehicle. There are generally two types of seat latch actuators which are electrical seat latch and mechanical seat latch. Electrical seat latch type was analyzed in this study. The structures of electrical seat latch actuator were defined as powered by electric motor and powered by solenoid. Besides, most of application for electrical seat latch uses the electric motor (brush electric motor) to actuate/open the latch. The types of electric motor and solenoid actuator were investigated. The design requirement, original equipment manufacturer specification and formal regulations show that mechanical and electrical requirements for electrical seat latch. The mechanical requirements are same for electric motor and solenoid actuator. On the other hand, electrical requirements for electrical seat latch show a lot of difference between electric motor and solenoid actuator. Therefore, using a solenoid actuator has more advantages than using electric motor to open the latch in terms of cost and design. The required actuation force and displacement to open the seat latch mechanism was defined by customer specifications. In terms of the displacement and produced force by solenoid, the mover (core) behavior of solenoid was investigated in the case of the limited duration of analysis on the Ansys Maxwell environment according to design constraints and criteria. The critical design parameters were determined by using Taguchi's design of experiment method. Then suitable solenoid model was determined for providing the desired design criteria.

Keywords: Actuator; finite element method; electromechanical actuator; electrical seat latch; solenoid actuator; design of experiment

1. GİRİŞ

Günümüzde, sportif arazi aracı, kamyon, kamyonet, binek ve hafif ticari gibi birçok araç tipi katlanabilir koltuk sistemine sahiptir. Bu tip araçlarda katlanabilir koltuk sistemlerinin dik pozisyonda kalabilmesi için koltuk kilitleri kullanılmaktadır [1]. Koltuk kilitleri, gerekli olduğu durumlarda bagaj hacmini artırabilmek için koltuğun dik pozisyonundan serbest kalmasını sağlayan otomotiv komponentleridir. Bir koltuk kilidinde ait montaj, yerleşim alanı ve fonksiyonunu içeren bir görsel Şekil 1'de verilmiştir [2]. Aynı zamanda, koltuk kilitleri çarpışma anında



Şekil 3. Selonoid modeli (a) sabit mıknatıslı (b) sabit mıknatıssız [10,16]

Şekil 3 (a)' da gösterilen aktüatör, temel olarak, sabit mıknatıs, ferit bir nüve ve bir yaydan oluşur [10]. Sabit mıknatıs kullanımı, daha düşük güçlerle yüksek kuvvetler üretebilme imkanı sağladığından üretim açısından maliyet avantajı sağlamaktadır [11]. Birçok robotik uygulamada, doğrusal ve rotasyonel harekete ihtiyaç duyar. Özellikle doğrusal hareket gereksinimleri bazı uygulamalarda önemli bir ihtiyaç haline gelmektedir. Doğrusal bir hareketi üretmek için genellikle iki metot kullanılır. Bu metotlardan ilki rotasyonel hareketin, doğrusal harekete dönüştürülmesi aracılığı ile sağlanırken, diğer metotta doğrusal hareket farklı bir ekipmana ihtiyaç duyulmaksızın lineer bir aktüatör ile sağlanır. Burada bahsedilen ilk metotta, mekanik kayıplar ve ilave tasarım maliyetleri ortaya çıktığından daha çok doğrusal hareketlerin lineer aktüatörler vasıtasıyla üretilmesi tercih edilmektedir [12]. Selonoid aktüatörlerin kontrolü temel elektromanyetik formüller ile tanımlanabilmektedir [13]. Selonoid aktüatörler, güç iletim sistemleri gibi birçok kontrol prosesinde de kullanılmaktadır [14]. Selonoid aktüatörler, valf ve anahtar olarak da kullanılabilir. Selonoidlerin öne çıkan en önemli özellikleri ise düşük maliyet ve basit yapılarıdır. Bir selonoidin temel yapısında, bir taşıyıcı hareket kolu, bir yay, bir stator, bir bobin ve tipine bağlı olarak sabit mıknatıs yer almaktadır [15]. Şekil 3 (b), sabit mıknatıssız bir selonoid üzerindeki kuvvetleri göstermektedir. Bu kuvvetler, F_{ext} (Dış Kuvvet), F_{spr} (Yay Kuvveti) ve F_{mag} (Mıknatıslanma Kuvveti) olarak isimlendirilmektedir [16]. Bir selonoid'in pozisyonunu hesaplamak için indüktans ve pozisyon arasındaki ilişkiyi incelemek gerekir. Selonoid aktüatöre ait bir devre (1) numaralı eşitlik ile formüle edilebilir.

$$v = Ri + \frac{d\Phi}{dt} \quad (1)$$

Buradaki v , R , Φ ve t , sırasıyla voltaj, iç direnç, akı ve zamanı temsil etmektedir. Akı ise eşitlik (2) ile hesaplanır.

$$\Phi = Li \quad (2)$$

Buradaki L selonoid'in indüktansını ve i ise selonoid'in bobini üzerinden geçen akımı temsil etmektedir. Aynı zamanda, voltaj ve akım, dc (doğru akım) ve ac (alternatif akım) bileşenlerine sahiptir. Dolayısıyla buradaki voltaj ve akım eşitlik (3) ve (4) ile temsil edilmektedir.

$$v = v_{ac} + V_{dc} \quad (3)$$

$$i = i_{ac} + I_{dc} \quad (4)$$

Bir selonoid'in indüktansını hesaplamak için eşitlik (1)'den eşitlik (4) kadar olan formülasyonlar göz önüne alındığında, indüktans değeri eşitlik (5) ile tanımlanabilir.

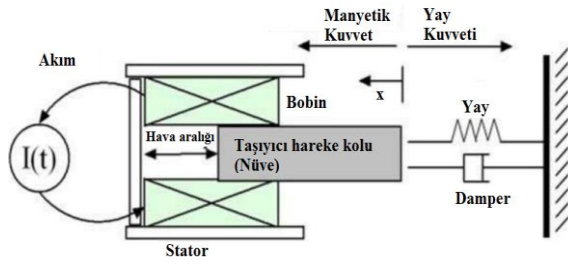
$$L = \frac{1}{\omega} \sqrt{\left(\frac{v_{ac}}{i_{ac}}\right)^2 - \left(\frac{V_{dc}}{I_{dc}}\right)^2} \quad (5)$$

Eşitlik (5)'de ω , v_{ac} , ve i_{ac} , açısal frekans, ac voltajın genliği ile ac akımın genliklerini temsil etmektedir [15]. Selonoid'in bobini üzerinden geçen akım manyetik bir alan oluşturur. Selonoid bobini üzerine şarj edilen enerji ise eşitlik (6) daki gibi hesaplanır [17].

$$W_{mag} = \frac{V}{2} L(x, i) i^2 \quad (6)$$

Buradaki V hacim katsayısı, L bobin indüktansı, x taşıyıcı hareket kolunun pozisyonu, i geçen akım'ı temsil etmektedir. Taşıyıcı hareket kolu ile stator arasındaki hava aralığı mesafesinin değişimi, selonoid üzerindeki bobinin indüktansını değiştirir. Ayrıca akım arttığında, manyetik saturasyonun bir sonucu olarak, indüktans değeri değişir. Buradaki indüktans, taşıyıcı hareket kolunun pozisyonu x ve bobin üzerinden geçen akımını bir fonksiyonu olarak tanımlanabilir. Manyetik kuvvet F_{mag} ise eşitlik (7)'deki gibi hesaplanabilir [18].

$$F_{mag} = \frac{V}{2} \left| \frac{\partial L(x, i)}{\partial x} \right| i^2 \approx \frac{V}{2} \left| \frac{\partial L(x, i)}{\partial x} \right| i_{dc}^2 \quad (7)$$

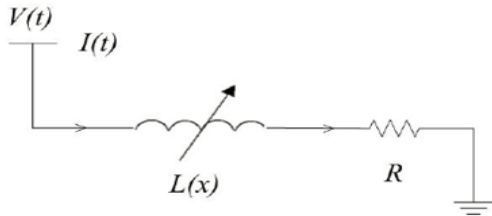


Şekil 4. Selonoid bir aktüatör için kütle-yay-damper modeli [18]

Bir selonoid'e ait kütle-yay-damper modeli Şekil 4'de gösterilmiştir. Bu sistemin matematiksel modeli ise eşitlik (8)'deki gibi hesaplanabilir.

$$m \frac{d}{dt} \left(\frac{dx}{dt} \right) + c \frac{d}{dt} + kx(t) = \frac{\mu_0 \mu_r N^2 A I(t)^2}{2(e+x_0-x(t))^2} \quad (8)$$

Buradaki $x(t)$ taşıyıcı hareket kolunun zaman bağlı yer değiştirmesini, μ_0 havanın geçirgenliğini, A taşıyıcı hareket kolunun kesit alanını, N bobin sarım sayısını, μ_r bobin ve taşıyıcı hareket kol arasındaki dielektrik malzemenin geçirgenliğini, x_0 taşıyıcı hareket kolu ile stator arasındaki hava aralığını, e selonoid'in geometrisinden kaynaklanabilecek ilave hava aralığını temsil etmektedir. Ayrıca m kütle, k yay katsayısı ve c damper katsayısını temsil etmektedir.



Şekil 5. Selonoid'in eşdeğer devre modeli [18]

$I(t)$ bobin üzerinde zamana bağlı geçen akımı temsil eder. Genellikle pratik uygulamalarda akım kaynağından ziyade gerilim kaynağı giriş kaynağı olarak kullanılır. $V(t)$ selonoid'in giriş kaynağını temsil etmektedir. Şekil 5'de bir selonoid'e ait elektriksel eşdeğer devre modeli gösterilmiştir. Buradaki R selonoid'in direncini, $L(x)$ taşıyıcı hareket koluna bağlı indüktansı, x taşıyıcı kolun pozisyonu (hava aralığını) temsil etmektedir. $L(x)$ eşitlik (9)'daki gibi formülize edilebilir.

$$L(x) = \frac{\mu_0 \mu_r N^2 A}{e+x_0-x(t)} \quad (9)$$

$I(t)$ akımı, taşıyıcı hareket kolunun uygulayacağı manyetik kuvveti belirler. Cheung, gerilim kaynağı ile sürülen bir selonoid'in dinamik akım davranışı üzerine çalışmıştır. Dinamik indüktans değişimini

incelendiğinde, devre dinamiği eşitlik (10)'daki gibi hesaplanabilmektedir [18-19].

$$L(x) \frac{dI(t)}{dt} + \frac{dL(x)}{dt} I(t) + I(t)R = V(t) \quad (10)$$

2. METOT

Elektrikli koltuk kilitleri için tasarım şartnameleri, müşteri gereksinimleri ve yasal regülasyonlar, mekanik ve elektriksel kriterlerden oluşmaktadır. Bu kriterlerin büyük bir çoğunluğu mekanik sınır şartları ve gereksinimlerden oluşmaktadır. Bu kriterler Tablo 1'de verilmiştir [20].

Tablo 1. Tasarım doğrulama kriterleri [20].

No	Test İsmi	Kabul Kriterleri
1	Statik Test $F_x=2960$ daN, $F_y=325$ daN, $F_z=1262$ daN Bileşke= 3235 daN (Static Test)	Test Sonrası Kırılma/Kopma Olmaması Gerekli.
2	Açılma Eforu (Unlock Effort)	Uygulanamaz. (Elektrikli Aktüatörler için Uygulama Dışı)
3	Kilitlenme Eforu (Lock Effort)	<25daN
4	Klimatik Dayanım - $30^\circ\text{C} / +70^\circ\text{C}$, 5000 Çevrim (Climatic Durability)	Test Sonrası Ürün Fonksiyonelliğini Devam Ettirmeli.
5	Isınma Direnci (Heat Resistance)	80°C de 22 saat Boyunca ve Sonrasında Görsel Değişim Olmamalı. Fonksiyonel Bozukluk Olmamalı.
6	Gıcırdama ve Gürültü Testi (Squeak and Rattle Test)	Müşteri Tarafından Özel İstekler Doğrultusunda Gerçekleştirilir.
7	Fonksiyonel Test (25Nm Tork Altında) (Functional Test under Fixing Condition)	Kilit Fonksiyonunu Korumalı ve Açılmamalı.
8	Elektromanyetik Uyumluluk (EMC)	Bir Komponent Olarak Motor Tanımlı Laboratuvarlarda Test Edilmeli.
9	Montaj – Demontaj (Assembly – Disassembly)	3 Kez Montaj-Demontaj Sonrası Fonksiyonel Bozulma Olmamalı.
10	Perçin Pinlerinin Tork Direnci (Torque Resistance of Riveting Pins)	Perçin Pinleri, 25 +/- 3 Nm Torka Dayanmalı, Fonksiyonel Bozulma Olmamalı.
11	Korozyon Direnci (Corrosion Resistance)	Fonksiyonel Bozukluk Olmamalı.

Elektrikli ve mekanik (manuel) koltuk kilitleri bir araç için güvenlik elemanları olduğu için ECE (Economic Commission for Europe) regülasyonlarını güvenlik kriterleri açısından doğrulanması gerekir. Ayrıca elektrikli bir koltuk kilidinin Tablo 1’de yer alan EMC (Elektromanyetik Uyumluluk) gereksinimini de sağlaması gerekir. Burada mekanik olan güvenlik gereksinimlerinden ziyade, elektriksel gereksinimler incelenmeye çalışılmıştır [20]. Bu çalışmada ele alınan koltuk kilidi otomotiv ana sanayilerinden olan JLR (Jaguar Land Rover) standartlarında yer alan gereksinimlere göre değerlendirilmiştir. Bu şartnameye göre, elektrik - elektronik komponentler ve bunların alt sistemleri kategorize edilmektedir. Bu kategoriler, pasif modül (P), indüktif aygıtlar (R), elektrik motorlar (BM) ve aktif elektronik modüller (EM yada AX) den oluşmaktadır. Tablo 2’de tasarım kriterleri için seçim matrisi yer almaktadır. Temel olarak, elektrikli koltuk kilitleri için selonoid yada elektrik motorlu aktüatör tiplerini bu seçim matrisi üzerinden seçilmesi öngörülmektedir. Burada selonoid aktüatörler için (R), elektrik motorlu aktüatörler için (BM) kategorisi seçilmektedir [21].

Tablo 2. Tasarım kriteri seçim matrisi [21].

✓	Kriter Tipi	Test Adı	Komponent Kategorisi				
			P	R	BM	EM	AX
Kriter Uygulanabilirliği (✓)	Radyo Frekans Emisyon Testi (RF Emissions)	RE 310			✓	✓	✓
		CE 420			✓	✓	✓
	Geçici Rejim Yayılım Testi (Conducted Transients)	CE 410		✓	✓	✓	
	Radyo Frekans Bağışıklık Testi (RF Immunity)	RI 112				✓	✓
		RI 114				✓	✓
		RI 115				✓	✓
	Manyetik Alan Emisyon Testi (Magnetic Field Emissions)	RE 320			✓,3	✓,3	
	Manyetik Alan Bağışıklık Testi (Magnetic Field Immunity)	RI 140			✓,2	✓,2	
	Eşleşme Bozukluk Testi (Coupled Disturbances)	RI 130				✓	✓
		RI 150				✓	✓

Kesintisiz Bozukluk Testi (Continuous Disturbances)	CI 210				✓	✓
Geçici Rejim Testi (Transients)	CI 220	✓			✓	✓
Yeniden Başlatma Testi (Power Cycling)	CI 230				✓	✓
Şasi Değişim Testi (Ground Offset)	CI 250				✓	✓
Düşük Geçici Rejim Testi (Low Voltage Transients)	CI 265				✓,1	✓,1
Aşırı Voltaj Dayanımı (Voltage Overstress)	CI 270	✓	✓	✓	✓	✓
Elektrostatik Deşarj (ESD)	CI 280	✓		✓,2	✓	✓

2.1. Elektrikli Koltuk Kilitleri için EMC Gereksinimleri

Elektrikli koltuk kilitleri için belirlenen iki tahrik sistemi olan BM ve R kategorileri Tablo 2’de belirtilen test gereksinimlerini sağlaması gerekir. Eğer BM kategorisini kullanan bir elektrikli koltuk kilit kategorisini kullanıyorsanız, EMC için RE 310, CE420, CE410, RE320, RI 140, CI270 ve CI280 test kriterlerini sağlayarak tasarımı doğrulanır. Diğer taraftan, eğer R kategorisinden bir selonoid tahrik sistemi kullanıyorsanız, sağlamanız gereken test kriterleri CE410 (conducted transients) ve CI270 (voltage overstress)’dir. Buradan da anlaşılacağı üzere R kategorisinin kullanımı, maliyet ve tasarım kriterleri açısından BM kategorisine göre 5 test kriterini (RE310, CE420, RE320, RI 140 ve CI280) eleyerek avantaj yaratmaktadır.

2.1.1. Geçici Rejim Emisyonu : CE410

Elektrikli koltuk kilit modülü, Tablo 3’de belirtilen kriterler uygulandığında gerilim (transient voltage) üretmemesi gerekir.

Tablo 3. Geçici rejim emisyon gereksinimleri [21].

Uygulanabilirliği	Test Altındaki Ürün	Kriter	Limitler
Güç Kaynağı Hattı Üzerindeki Geçici Rejim Emisyonu	Röle, Elektrik Motorları ve Selonoid Valfler	≤ 2 ms > 2 ms	+75 V / -80 V 20 V

2.1.2. Aşırı Voltaj Dayanımı : CI 270

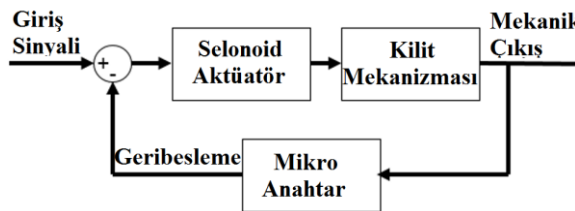
Elektrikli koltuk kilit modülleri, Tablo 4’de belirtilen aşırı voltaj ve süre kriterlerine karşı dayanım göstermelidirler.

Tablo 4. Aşırı voltaj dayanım gereksinimi [21]

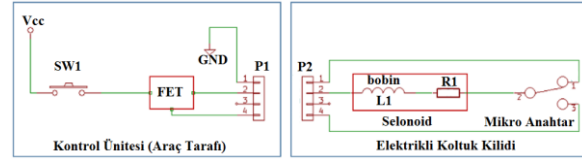
Voltaj Genliği (V)	Uygulama Süresi
-14 (-0.7, +0)	≥ 60 saniye
19 (+0.95, -0)	≥ 60 dakika
28 (+1, -0)	≥ 60 saniye

2.2. Koltuk Kilit Mekanizması için Selonoid Aktüatör Tasarımı

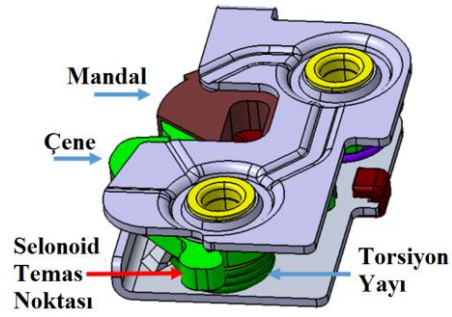
Genel olarak, selonoid aktüatörlü koltuk kilitleri, bir selonoid, bir mikro anahtar, kilit mekanizması ve elektriksel bağlantılardan oluşur. Selonoid aktüatörlü bir koltuk kilidinin kontrol diyagramı Şekil 6’da gösterilmiştir. Buradaki mikro anahtar, kilit mekanizmasında geri besleme almak için kullanılmıştır. Mikro anahtar üzerinde gelen geri besleme, kilit mekanizmasını açık ya da kapalı olma durumlarını göstermektedir.

**Şekil 6.** Selonoid aktüatörlü elektrikli koltuk kilidinin kontrol diyagramı

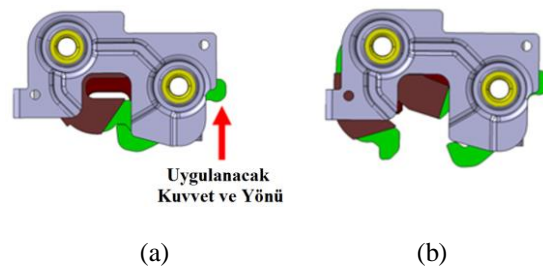
Selonoid aktüatörlü koltuk kilidinin elektriksel devre şeması Şekil 7’de gösterilmiştir. Buradaki devre şemasında hem araç üzerinde kontrol ünitesi hem de selonoid aktüatörlü koltuk kilidi içindeki elektriksel bağlantılar gösterilmiştir.

**Şekil 7.** Selonoid aktüatörlü elektrikli koltuk kilidinin elektriksel devre şeması

Şekil 7’de gösterilen bir SW1 anahtarı ile tetiklenen bir transistör (FET), P1 ve P2 konnektörleri üzerinden selonoid’in mikro anahtarının konumuna bağlı olarak selonoid’i enerjilendirmektedir. Kilit mekanizması ise dönebilen bir çene, bir mandal, bir torsiyon yayı ve mekanik bağlantı elemanlarından oluşur. Burada bahsedilen kilit mekanizmasına ait görsel Şekil 8’de verilmiştir.

**Şekil 8.** Koltuk kilidi mekanizma modeli

Aynı zamanda, Şekil 8 mandal ile çene arasındaki mekanik bağlantıyı açmak için tahrik edilmesi gereken temas bölgesi / kolunu da göstermektedir. Bunun yanında, kilit mekanizmasının kilitli ve açık olduğu pozisyonları göstermek için Şekil 9 verilmiştir. Şekil 9 (a)’da kilitli olan mekanizma, kırmızı ok yönünde temas koluna uygulanan bir kuvvet ile Şekil 9 (b)’deki kilidin açık olduğu pozisyona geçmektedir.

**Şekil 9.** (a) Koltuk kilit mekanizmasının kilitli durumu, (b) Koltuk kilit mekanizmasının serbest durumu

Kilit mekanizmasının açılması için gerekli olan minimum kuvveti bulabilmek için bir test gerçekleştirilmesi gerekir. Bu test bir dinamometre ile gerçekleştirilmektedir. Şekil 9 (a)’da gösterilen temas kolu ve kuvvet yönünde bir dinamometre ile 15

Newton'luk bir kuvvet 3mm'lik bir deplasman boyunca uygulanarak kilit mekanizmasını açmak için gerekli olan minimum kuvvetin bulunduğu otomotiv ana sanayiinde orijinal ekipman üreticileri tarafından belirtilmektedir. Bulunan bu kuvvet değeri, eşitlik (11)'de verilen yay kuvveti ve sürtünme kuvvetinden oluşmaktadır.

$$F_{release} = F_{spring} + F_{friction} \quad (11)$$

Bu çalışmada yapısal olarak farklı tiplerde selonoid'ler tasarlanmış ve incelenmiştir. Bu selonoid tipleri Taguchinin deney tasarım yöntemine göre tayin edilen selonoid'lerdir. Eşitlik (11)'de gösterilen kuvvet değeri ele alınarak, selonoid'in boyutlarını hesaplamak için eşitlik (12) ile eşitlik (15) arasındaki eşitliklerden yararlanılabilir.

$$F \cdot x = \frac{1}{2} Li^2(t) \quad (12)$$

$$P = V \cdot i(t) = \frac{Fx}{t} \quad (13)$$

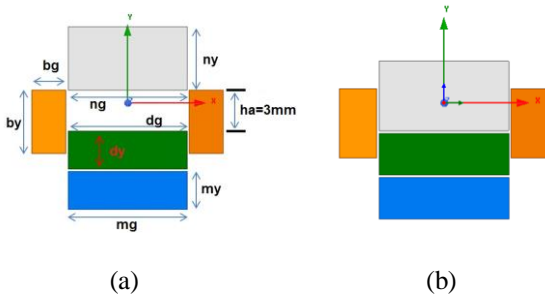
$$R = \frac{\rho \cdot l}{s} \quad (14)$$

$$L = \frac{\mu \cdot N^2 A}{l} \quad (15)$$

Eşitlik (12) ve (15) selonoid'in bobin uzunluğu, sarım sayısı, bobin ve tel çaplarını hesaplamak için kullanılırlar.

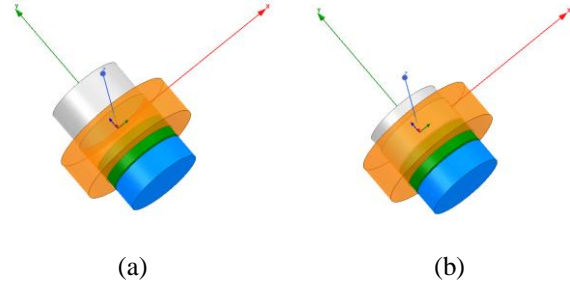
2.3. Selonoid İçin Tasarım Kısıtları ve Gereksinimleri

Bir selonoid modeline ait 2 boyutlu görünümü Şekil 10'da verilmiştir. Burada Şekil 10 (a) bobinin enerjisiz olduğu durumu, Şekil 10 (b) ise bobinin enerjili olduğu durumu temsil etmektedir.



Şekil 10. Model Selonoid için (a) enerjisiz ve (b) enerjili pozisyonlarda 2 boyutlu görünümü

Şekil 11'de ise Şekil 10'de gösterilen 2 boyutlu selonoid'lerin 3 boyutlu görüntüleri verilmiştir. Şekil 10 ve Şekil 11'de yeşil ile temsil edilen bölgeler durdurucu olarak kullanılmış ve polyamid malzemeden oluşmaktadır. Turuncu ile gösterilen bölgeler bobinin sarımlarıdır ve bakırdan oluşmaktadır. Gri ile gösterilen bölge taşıyıcı hareket kolunu temsil etmektedir ve çelik (steel1008), mavi bölge ile gösterilen alan ise sabit mıknatısı temsil etmektedir. Ayrıca sabit mıknatıs için mıknatıslanma yönü Y eksenine boyuncadır. Buradaki gösterimler ve malzeme tanımları Ansys Maxwell ortamında tanımlanmıştır.



Şekil 11. Model selonoid için (a) enerjisiz ve (b) enerjili pozisyonlarda 3 boyutlu görünümü

Şekil 10'da gösterilen selonoid parametreleri Tablo 5'de parametre kodu, birimi ve açıklaması ile birlikte verilmiştir. Tablo 5'deki selonoid parametreleri, kuvvet gereksinimleri ile tasarım hacmi ve kısıtları göz önünde bulundurularak Taguchi'nin deney tasarım metodu kullanılarak kritik parametrelerin tespiti ve uygun model seçim sürecine tabi tutulacaktır. Tasarım hacmi ve kuvvet gereksinimleri dikkate alındığında selonoid parametrelerinin alabileceği maksimum ve minimum değerlerde Tablo 5'de verilmiştir.

Tablo 5. Selonoid parametreleri

Parametre Kodu	Değer		Birimi	Açıklaması
	Min.	Maks.		
bg	2	3	mm	Bobin Kesit Alanının Genişliği
by	3	5	mm	Bobin Kesit Alanının Yüksekliği
ng	5	10	mm	Taşıyıcı Hareket Kolunun (Nüve) Genişliği
ny	3	5	mm	Taşıyıcı Hareket Kolunun (Nüve) Yüksekliği
dg	5	10	mm	Durdurucu Parçanın Genişliği
dy	1	3	mm	Durdurucu Parçanın Yüksekliği
mg	0,5	10	mm	Sabit Mıknatısın Genişliği

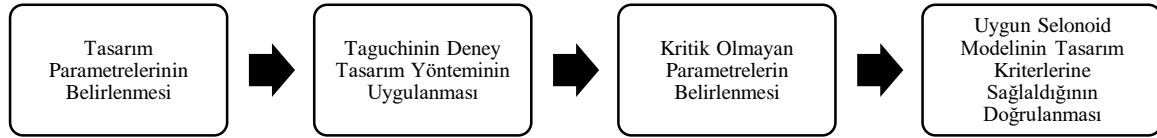
my	0,5	3	mm	Sabit Mıknatısın Yüksekliği
ha	3	3	mm	Hava Aralığı Mesafesi
N	750	2500	-	Bobinin Sarımlar Sayısı (Bobin Kesit Alanına Bağlıdır)

Şekil 11’de gösterilen model –Y ekseninde 200 milisaniye boyunca analiz edilerek, taşıyıcı hareket kolunun 3mm deplasman boyunca 15 Newtonluk kuvveti uygulaması ve kilit mekanizmasını açması için yeterli olması gerekmektedir. Ansys Maxwell programında sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak çözülecek analiz modeline geçici rejim analizi boyunca 12 Volt genliğe sahip bir PWM (Darbe Genlik Modülasyonu) sinyali %25 ON ve %75 OFF olacak şekilde dolayısıyla 50 milisaniye ON ve 150 milisaniye

OFF olarak uygulanması JLR’nin şartnamesinde belirtilmektedir.

2.4. Kritik Parametrelerin Belirlenmesi için Deney Tasarımı

Taguchi’nin deney tasarım yöntemi ile kritik tasarım parametrelerinin belirlenmesi ve önceliklendirilmesi gerçekleştirilebilmektedir. Taguchi’nin deney tasarım yönteminde öne sürdüğü konu bir sistemin fonksiyonelliğini etkileyen faktörlerdir. Bu faktörler sistemin kontrol edilebilirliği ile ilgilidir. Taguchi’nin yönteminde ise çeşitli gürültü varyasyonlarında, tasarım parametrelerinden daha az etkilenen kontrol faktörlerinin bulunmasına olanak tanımaktadır. Ayrıca Taguchi’nin yöntemi tasarım parametrelerinin tüm kombinasyonlarının test ya da analiz edilerek zaman ve maliyet gibi unsurların israf edilmesini / fazladan kullanılmasını önleyerek büyük bir avantaj da sağlayabilmektedir[22].



Şekil 12. Kritik parametrelerin belirlenmesi ve uygun tasarımın seçim diyagramı

Şekil 12’deki gösterim, tasarım parametreleri belirlenen bir tasarım için Taguchi’nin deney tasarım yönteminin uygulanarak elde edilen sonuçlar üzerinden kritik olmayan parametrelerin belirlenerek ihtiyaç duyulan selonoid modelinin seçim adımlarını vermektedir. Tablo 5’deki parametrelerin, Taguchinin ortogonal deney tasarım tablosuna entegrasyonu düşünüldüğünde Taguchinin L12 tablosunun kullanılması gerekmektedir. Bu durumda oluşan deney dizisi Tablo 6’da verilmiştir. Ayrıca tasarım

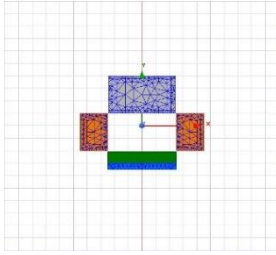
hacmindeki bazı kısıtlardan dolayı (örnek: taşıyıcı hareket koluna ait genişlik, durdurucu ve sabit mıknatısın genişliğini de etkiler) durdurucu ve sabit mıknatısın genişlikleri taşıyıcı hareket kolunun genişliğine bağlı olarak maksimum değerleri yeniden düzenlenmiştir. Ayrıca bobin parametrelerinden sarım sayısı da bobin kesit alanının genişliğine ve yüksekliğine bağlı olarak Tablo 6’da yeniden düzenlenmiştir.

Tablo 6. Selonoid parametreleri için Taguchi’nin L12 deney tasarım tablosu

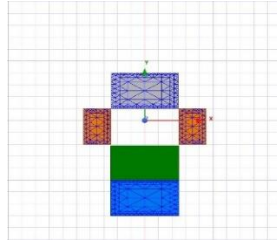
Deney No	bg (mm)	by (mm)	ng (mm)	ny (mm)	dg (mm)	dy (mm)	mg (mm)	my (mm)	N (-)	ha (mm)
1	2	3	5	3	5	1	5	0,5	750	3
2	2	3	5	3	5	3	5	3	750	3
3	2	3	10	5	10	1	10	0,5	750	3
4	2	5	5	5	5	1	5	3	1250	3
5	2	5	10	3	10	3	10	3	1250	3
6	2	5	10	5	5	3	5	0,5	1250	3
7	4	3	10	5	5	1	5	3	1500	3
8	4	3	10	3	10	3	10	0,5	1500	3
9	4	3	5	5	5	3	5	3	2500	3
10	4	5	10	3	5	1	10	3	2500	3
11	4	5	5	5	5	3	5	0,5	2500	3
12	4	5	5	3	5	1	5	0,5	2500	3

3. ANALİZ SONUÇLARI VE TARTIŞMALAR

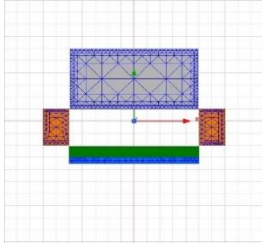
Bu bölümde deney tasarımı için parametreleri Tablo 6'da oluşturulan selonoid modellerinin analizleri gerçekleştirilmiştir. Tablo 6'daki analiz modellerinin sonlu elemanlar görünümlerine ilişkin $t=0$ anındaki pozisyonları Şekil 13'de verilmiştir. Şekil 13'de verilen 12 farklı selonoid modeli, Taguchi'nin deney tasarım tablosundaki yer alan 8 parametre ve 2 seviyeden oluşan sistemler için önerdiği L12 ortogonal deney dizisi kullanılarak oluşturulmuştur. Buradaki analiz kombinasyonlarında, selonoid'in taşıyıcı hareket kolu üzerindeki deplasman-zaman ve kuvvet-zaman grafikleri incelenmiştir.



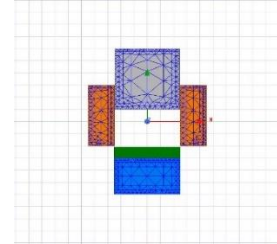
Deney No :1



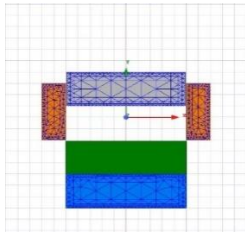
Deney No :2



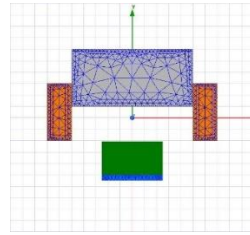
Deney No :3



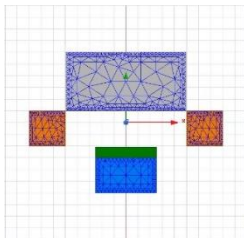
Deney No :4



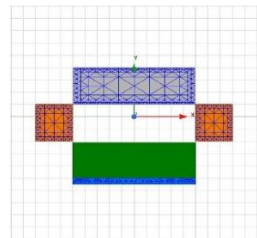
Deney No :5



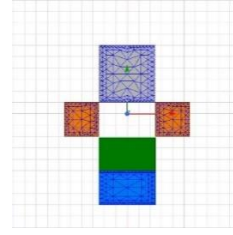
Deney No :6



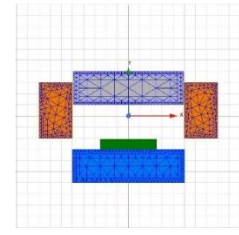
Deney No :7



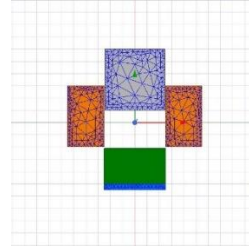
Deney No :8



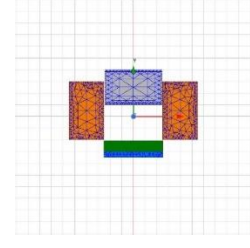
Deney No :9



Deney No :10



Deney No :11



Deney No :12

Şekil 13. Deney tasarım tablosundaki selonoidler için sonlu eleman modellerinin görünümleri

Yapılan analizlerde elde edilen kuvvet-zaman ve deplasman zaman grafiklerinde taşıyıcı hareket kolunun 3 mm'lik deplasman ilk ulaşma anı, 200 milisaniye boyunca elde edilen maksimum kuvvet, 200 milisaniye boyunca elde edilen ortalama kuvvet ve 200 milisaniye anındaki kuvvet değerleri incelenmiştir. Burada incelenmeye çalışılan maksimum kuvvet değerinin minimum 15 Newton olması gerekmektedir. Ortalama kuvvet ve 200 milisaniye anındaki kuvvet ise 15 Newton'un altında olması gereken değerlerdir. Eğer bu değerler 15 Newton'un üstünde bir kuvvet ile sonuçlanırsa, elektrikli koltuk kilit mekanizmasının tekrar kilitlenme pozisyonuna girmesini engelleyerek fonksiyonu önlemektedir. 3 mm deplasmana ulaşması dikkate alındığında elektrikli koltuk kilidini enerjilendirmek için kullanılan PWM sinyalinin $t=0$ anından $t=50$ milisaniye anları arasında aktif olmasından dolayı 3 mm'lik deplasmana ilk 50 milisaniyede ulaşılması beklenmektedir. Tablo 7'de deney tasarım tablosundaki yer alan ve Şekil 13'de gösterilen 12 adet analiz sonuçları verilmiştir.

Tablo 7. Deney tasarım tablosundaki selonoidler için analiz sonuçları

Deney No	3mm Deplasmana Ulaşma Zamanı (milisaniye)	Maksimum Kuvvet Değeri (N)	Ortalama Kuvvet Değeri (N)	200 milisaniye Anındaki Kuvvet Değeri (N)
1	17	-14,31	-11,67	-11,81
2	10	-33,78	-29,04	-28,83

3	24	-15,78	-12,43	-12,77
4	7	-188,70	-174,76	-177,14
5	9	-67,65	-65,32	-67,65
6	46	-3,45	-2,96	-3,45
7	8	-309,94	-299,92	-309,94
8	33	-3,30	-3,02	-3,30
9	13	-39,20	-34,65	-35,57
10	6	-200,92	-196,05	-200,92
11	38	-2,90	-2,10	-2,09
12	22	-12,52	-11,00	-11,82

Analiz sonrasında elde edilen bulgular Deney No:1, Deney No:3 ve Deney No:12'deki analiz modellerinin

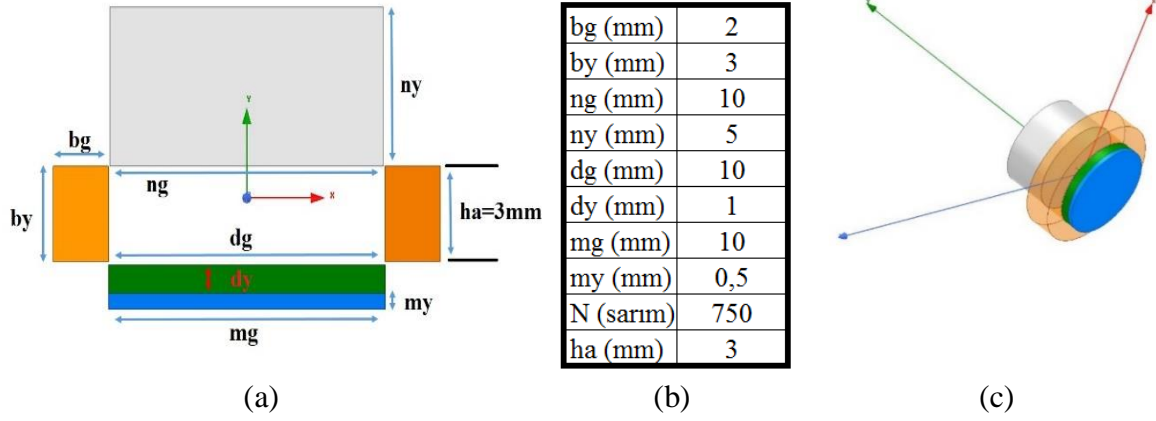
tasarım kriterlerine en fazla yaklaşan sonuçlar verdiğini göstermiştir. Özellikle Deney No:3 modelinin tasarım kriterlerini sağladığı görülmüştür. Tablo 7'de elde edilen sonuçlar Taguchi'nin deney tasarımı mantığında ele alınarak önce Tablo 7 için işaret gürültü oranlarının tayini yapılmıştır. Bu işaret gürültü oranları üzerinde parametreler için belirlenen iki seviye olan maksimum ve minimum değerleri, Taguchi'nin deney tasarım yönteminde belirttiği dizi üzerinde tekrar değerlendirilmiştir. Böylece parametreler için derecelendirme yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar selonoid modelinde belirtilen hangi parametrelerin önem derecelerinin daha yüksek ve sonuca doğrudan etkilediği göstermiştir. Selonoid parametreleri için öncelik sıralaması Tablo 8'de verilmiştir.

Tablo 8. Selonoid parametreleri için öncelik sıralaması

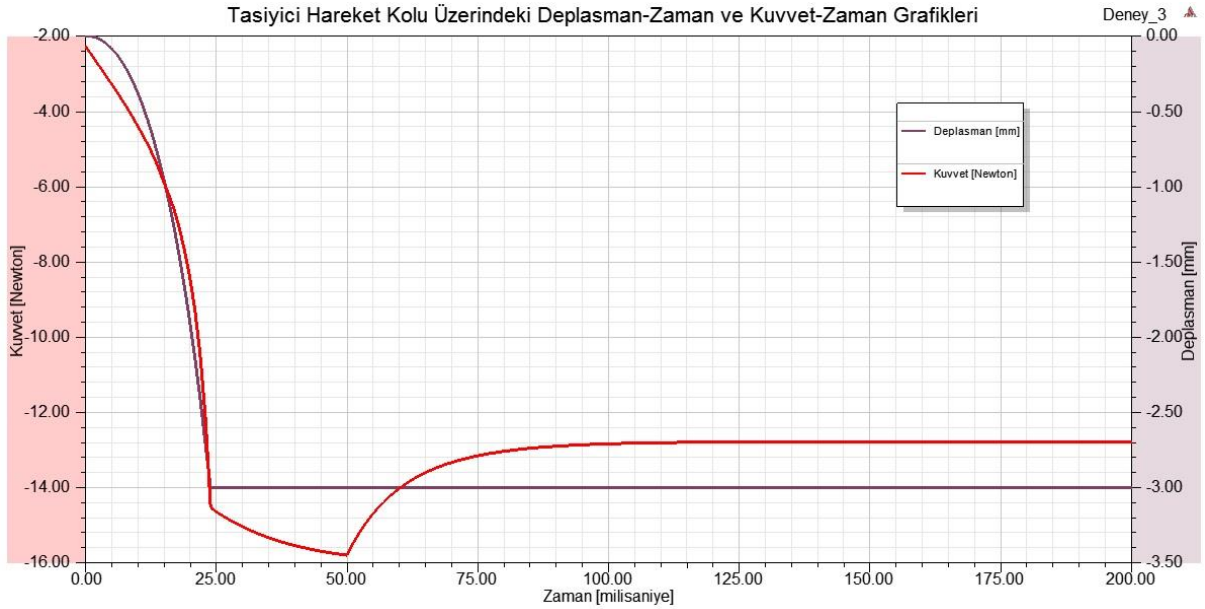
Etkilenen Faktörler	Tasarım Parametrelerinin Önem Dereceleri									
	bg	by	ng	ny	dg	Dy	mg	my	N	ha
3mm Deplasmana Ulaşma Zamanı (milisaniye)	5	7	6	3	8	2	4	1	-	-
Maksimum Kuvvet Değeri (N)	6	8	3	4	7	2	5	1	-	-
Ortalama Kuvvet Değeri (N)	8	5	3	7	4	2	6	1	-	-
200 milisaniye Anındaki Kuvvet Değeri (N)	7	6	3	8	5	2	4	1	-	-
Genel Sıralama	7	7	3	5	6	2	4	1	-	-

Elde edilen sonuçlar selonoid modelinde belirtilen hangi parametrelerin önem derecelerinin daha yüksek ve sonuca doğrudan etkilediği göstermiştir. Selonoid parametreleri için öncelik sıralaması Tablo 8'de verilmiştir. Tablo 8'de görüldüğü üzere selonoid modeli için en önemli parametre mıknatısın yüksekliği olarak bulunmuştur. Bunu sırasıyla durdurucu malzemenin yüksekliği ve nüve genişliği takip

etmektedir. Bu bilgiler ve tolerans öngörülerini dikkate alınarak Deney No:3'teki selonoid modelini optimize edecek olursak, mıknatıs yüksekliği, durdurucu malzemenin yüksekliği ve nüve genişliği üzerinde çalışılabilir. Şekil 14, Deney No:3 selonoid modeline ait 2 boyutlu ve 3 boyutlu görünümle parametre değerlerini göstermektedir.



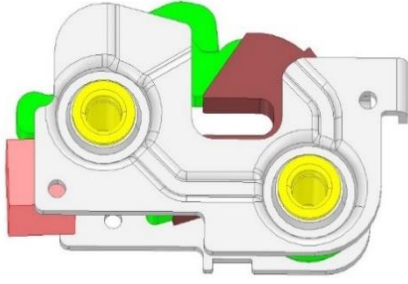
Şekil 14. Deney No:3 selonoid modeline ait görseller (a) 2 boyutlu görünüm, (b) parametre değerleri, (c) 3 boyutlu görünümü



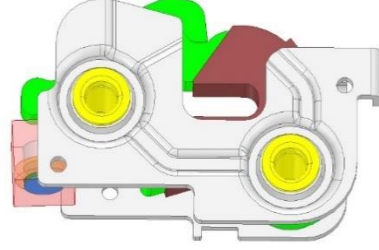
Şekil 15. Deney No:3'teki selonoid modeline ait kuvvet-zaman ve deplasman-zaman grafikleri

Deney No:3'ten elde edilen analiz sonuçlarında kuvvet-zaman ve deplasman-zaman değişimleri incelenmiştir. Şekil 15'de Deney No:3'te tanımlanan selonoid modeli için kuvvet-zaman ve deplasman-zaman grafikleri gösterilmiştir. Şekil 17'deki deplasman-zaman grafiğinden anlaşılacağı üzere 24 milisaniye anında taşıyıcı hareket kolunun göstermiş olduğu deplasman 3 mm'ye ulaşmaktadır. Sonrasında ise 200 milisaniye boyunca deplasman değişimi, durdurucu malzemenin göstermiş olduğu dirençten ötürü oluşmamaktadır. Buradaki taşıyıcı hareket kolu üzerindeki kuvvet-zaman değişimi ise 50 milisaniyede

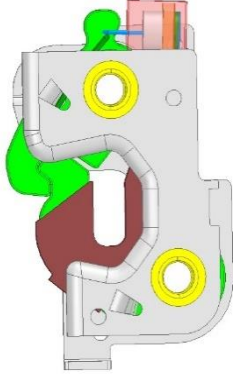
maksimum değerine ulaşarak 15 Newton değerini aşmaktadır. Sonrasında ise analiz sonuçları 50-200 milisaniye aralarında azalarak 15 Newton'un altına düşerek, Deney No:3'teki selonoid modelinin istenen tasarım kriterleri sağladığını göstermektedir. Deney No:3'teki selonoid modeli için yapılan analizler, selonoid modelinin doğrulanması işlemi gerçekleştirmiştir. Dolayısıyla bir sonraki adımda kilit mekanizması ile selonoid modelini entegrasyonu / montajı yer almaktadır. Bu entegrasyon çalışmasına ilişkin detaylar Şekil 16'da gösterilmiştir.



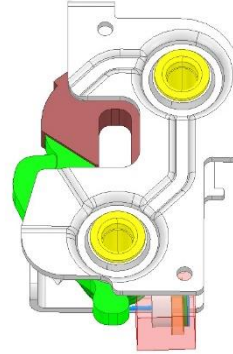
(a) Elektrikli Koltuk Kilidi Tam Görünümü



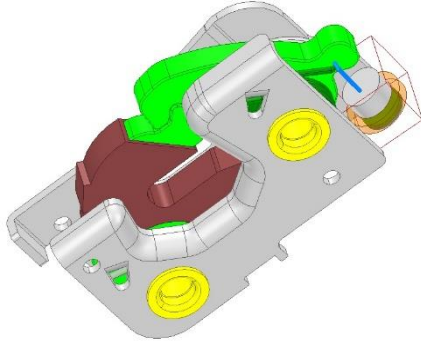
(b) Selonoidin Saydam Görünümü



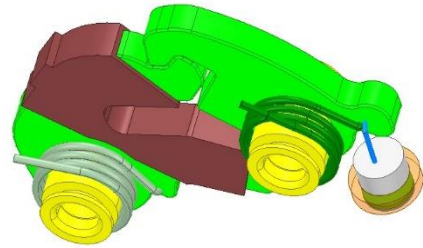
(c) Elektrikli Koltuk Kilidi Alttan Görünüm



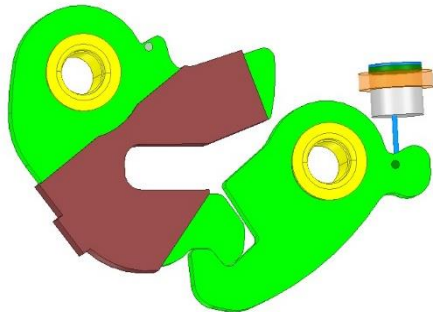
(d) Elektrikli Koltuk Kilidi Üstten Görünüm



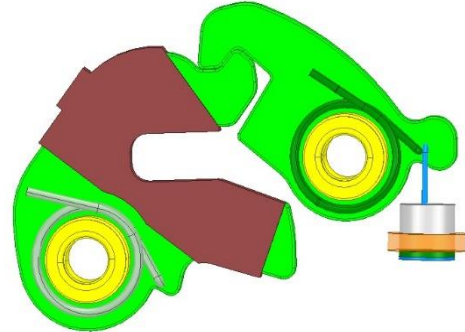
(e) Elektrikli Kilit Mekanizmasının Dıştan Görünümü



(f) Elektrikli Kilit Mekanizmasının İçten Görünümü



(g) Mekanik Bağlantının Üstten Görünümü



(h) Mekanik Bağlantının Alttan Görünümü

Şekil 16. Koltuk kilit mekanizması ile selonoid aktüatörün entegrasyon / montaj görüntüleri

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada üst segment araçlarda kullanılan koltuk kilidi sistemleri incelenmiştir. Katlanabilir koltuk ünitelerinde elektrikli koltuk kilitleri için tahrik sistemleri ele alınarak değerlendirilmeye çalışılmıştır. Yapılan araştırmalarda solenoid'li ve elektrik motorlu tahrik sistemlerinin kullanıldığı görülmüştür. Otomotiv ana sanayi beklentileri ve yasal regülasyonlarda yer alan tasarım kısıtları ile test şartnameleri (EMC beklentileri vb.) dikkate alındığında solenoid'li tahrik modelinin tasarım ve maliyet açısından avantaj sağladığı görülmüştür. Solenoid'li bir tahrik sistemi kullanıldığında, sağlamanız gereken test kriterleri CE410 (conducted transients) ve CI270 (voltage overstress)'dir. Dolayısıyla solenoid kullanımı, maliyet ve tasarım kriterleri açısından elektrik motoru kategorisine göre 5 test kriterini (RE310, CE420, RE320, RI 140 ve CI280) eleyerek avantaj yarattığı görülmüştür. Çalışmada solenoid tipleri ile ilgili literatür taraması yapılarak, mekanik ve elektrikselsel açıdan matematiksel modelleri incelenmiştir. Ayrıca koltuk kilit mekanizmasının açılabilmesi için gerekli olan kuvvetin 15 Newton olduğu ve bu kuvvetin 200 milisaniye içinde uygulanarak 3 mm'lik deplasman sağlaması gerektiği ana sanayi beklentileri ile şartnamelerinde yer almaktadır. Bununla birlikte tasarım kısıtları (tasarım uzayı) göz önüne alınarak temel solenoid parametreleri belirlenmeye çalışılmıştır. Belirlenen solenoid tasarım parametreleri Taguchi'nin deney tasarım yöntemi ile incelendiğinde, kritik parametrelerin mıknatıs yüksekliği, durdurucu malzemenin yüksekliği ve nüve genişliği olduğu görülmüş, ayrıca uygun tasarım kriterlerini sağlayan solenoid modelinin deney tablosu üzerinden Deney No:3'teki solenoid modeli olduğunu göstermiştir. Bu çalışmada yapılan analizlerin tamamı Ansys Maxwell ortamında sonlu elemanlar yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Taguchi'nin deney tasarım yöntemi ile 8 parametre 2 seviye için gerçekleştirilmesi gereken 256 deney ile harcanacak zamandan ve maliyetten tasarruf edilerek, Tablo 6'da gösterilen 12 deney ile büyük bir avantaj sağladığı da görülmüştür. Deney No:3'teki solenoid modelinin tasarım kriterlerini sağlaması ile birlikte kilit mekanizması için entegrasyon / montaj çalışması gerçekleştirilerek tasarım tamamlanmıştır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma Marmara Üniversitesi ve Coşkunöz Holding A.Ş. tarafından desteklenmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] Honda Motor Co. Ltd., (2011). Vehicle Seat Latch Striker and Assist Handle. *US8066328B2*.
- [2] Solmaz E., Akbulut U., & Yıldız M.E., (2014). Adapting A Latch Mechanism to Whole Seat Frames and Releasing Systems. *OTEKON2014*

7th Automotive Technologies Congress, Bursa, Turkey.

- [3] Porter Group LLC., (2008). Vehicle Seat Latch. *US007431371B2*.
- [4] Hyundai Motor Company, (2014). Seat Latch Structure. *US008672386B2*.
- [5] Austem Co., Ltd., (2011). Latch Assembly for Vehicle Seat. *US007959205B2*.
- [6] Johnson Controls Technology Company, (2015). Two Way Positive Locking Latch. *US006908137B2*.
- [7] Magna Closures S.p.a., (2014). Electrical Vehicle Latch. *US20140175813A1*.
- [8] Bur, A., Dierauer, P., and Ricks, L., (2003). Honeywell's Automotive Door Latch Design is Ideal for Corporate Latch Strategy. *SAE-2003-01-1190*, pp. 1-8.
- [9] Udriste, D. and Negrus, E., (2003). Construction and Kinematics of Automotive Side Door Latch Mechanisms. *SAE-2005-01-0881*, pp. 1-7.
- [10] Obata S., Kimura K., and Saito Y., (2012). Development of Functional Force Solenoid Actuator. *IEEE Mechatronics-REM*, pp. 14-19, Paris.
- [11] Hüner E., Aküner M.C., and Demir U., (2015). A New Approach in Application and Design of Torodial Axial-Flux Permanent Magnet Open-Slotted NN Type (TASPMOS-NN) Motor. *Tehnički vjesnik* 22, 5, 1193-1198.
- [12] Obata S., and Haneyoshi T., Saito Y., (2014). New Linear Solenoid Actuator for Humanoid Robot. *IEEE Mechatronics*, pp. 367-370, Tokyo.
- [13] Obata S., A, (2014). Basic Electromagnetic Theory for Controlling Solenoid Actuators. *IEEE Mechatronics*, pp. 400-405, Tokyo.
- [14] Meng F., Zhang H., Cao D., and Chen H., (2016). System Modeling and Pressure Control of a Clutch Actuator for Heavy-Duty Automatic Transmission systems. *IEEE Transaction on Vehicular Technology*, Vol.65, No.7, pp. 4865-4874.
- [15] Nagai S., Nozaki T., and Kawamura A., (2015). Real-time Position Sensorless Estimation of Position and Force of Solenoid Actuator for Haptic Devices. *EPE'15 ECCE-Europe 17th European Conference on*, pp. 1-9.
- [16] Nagai S., and Kawamura A., (2016). Realization of Bilateral Control by Compact Solenoid Actuators without Position and Force Sensors. *IEEE Advanced Motion Control*, pp. 1-6, New Zealand.
- [17] Nagai S., Nozaki T., and Kawamura A., (2016). Environmental Robust Position Control for Compact Solenoid Actuators by Sensorless Simultaneous Estimation of Position and Force. *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, Vol.63, No.8, pp. 5078-5086.
- [18] Li C., Yang H., Jenkins L.L., Dean R., Flowers G.T. and Hung Y., (2016). Enhanced-

- Performance Control of an Electromagnetic Solenoid System Using a Digital Controller. *IEEE Transaction on Control System Technology*, Vol.24, No.5, pp. 1805-1811.
- [19] Doeuff R. L. and Zaim M. H., (2010). Rotating Electrical Machines, Chapter 1, Edition 1, Wiley.
- [20] European Regulations related to Crash Testing, Uniform provisions concerning with the approval of vehicles with regard to seats, their anchorages and any head restraints, (2002). *ECE R-17, Reg. 17 - Rev.4*.
- [21] Jaguar Land Rover Limited – Engineering Standard, (2013). Electromagnetic Compatibility Specification For Electrical/Electronic Components and Subsystems. *JLR-EMC-CS V1.0 Amendment 4.*,
- [22] Demir, U., and Aküner, M.C., (2017). Using Taguchi Method in Defining the Critical Rotor Pole Data of LSPMSM Considering the Power Factor and Efficiency, *Tehnički vjesnik* 24, 2, 347-353.

Çeşitli Makine Kısıtlarını İçeren Optimum Hücre Tasarım Problemi için Matematik Programlama Modeli

A Mathematical Programming Model for Optimum Cell Design Problem Involving Various Machine Constraints

Onur DERSE¹ , Ebru YILMAZ² 

¹Tarsus Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, Yönetim ve Organizasyon Bölümü, 33400, Tarsus, Mersin, Türkiye

²Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 01330, Sarıçam, Adana, Türkiye

Öz

Hücresele üretim sistemleri, firmaların sürekli gelişen teknolojiye ve rekabete adaptasyon sağlayabilmesi amacıyla kullanılan ve benzer işlemlerin benzer ortamlarda üretilmesi esasına dayalı olan sistemlerdir. Hücresele üretim sistemlerinin etkin bir şekilde kurulması ve tasarlanması ile işlemlerin daha hızlı ve daha az maliyetle gerçekleşmesi sağlanabilmektedir. Bu çalışmada, kalemleri, üretim maliyeti, makinelerin hazırlık maliyeti, makinelerin bakım maliyeti ve personel maliyeti olan en uygun toplam tasarım maliyetini hedefleyen bir matematik programlama modeli oluşturulmaktadır. Bu modelde, makinelerin kapasiteleri, hücreyi oluşturmak için gerekli olan en az makine sayısı, her makine türünün en fazla atanabileceği hücre sayısı, parçaların en az kaç makinede işlem görebileceği, parçaların en fazla kaç makinede işlem görebileceği ve parçaların hangi makinelerde işlem göremeyeceği gibi çeşitli kısıtlar dikkate alınmaktadır. Önerilen bu model, geliştirilen beş farklı parçadan ve dokuz farklı olmak üzere toplamda on bir makineden oluşan bir örnek problem üzerinde uygulanmaktadır. Bu problemin çözümünde GAMS optimizasyon programı kullanılmış olup bir saniyeden daha kısa bir sürede toplam tasarım maliyetini en küçükleyen hücre tasarımı sonuçları ortaya çıkmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Hücresele üretim sistemleri, Hücre tasarımı, Optimizasyon, Matematik programlama modeli

Abstract

Cellular manufacturing systems are systems based on the production of similar processes in similar environments which are used in order to enable companies to adapt to constantly developing technology and competition. With the efficient establishment and design of cellular production systems, processes can be realized faster and with less cost. In this article, a mathematical programming model which aims the optimum total design cost involving production cost, setup cost of machines, maintenance cost of machines and personnel cost is developed. In the model, various constraints such as capacities of machines, minimum number of machines required to form a cell, maximum number of cells each machine type can be assigned to, minimum number of machines for which parts can be processed, maximum number of machines for which parts can be processed and type of machines that cannot process parts are considered. This proposed model is applied on a developed sample problem consisting of five different parts and total eleven machines with nine different machines. Using GAMS optimization program to solve this problem, the results of the cells design which make the total design cost optimum are ensured in less than one second.

Keywords: Cellular manufacturing systems, Cell design, Optimization, Mathematical programming model

I. GİRİŞ

Günümüz şartlarında teknolojinin gelişmesi ile birlikte rekabet sürekli artmakta ve dolayısıyla sistemler kendilerini sürekli geliştirmek zorunda kalmaktadır. Bu zorunluluk nedeniyle ortaya çıkan sistemlerden birisi de hücresele üretim sistemleridir. Üretkenliği artırmak ve süreç esnekliğini geliştirmek için hücresele imalat sistemlerine olan ilgi artmaktadır [1]. Hücresele üretim, hem maliyetlerin azaltılmasına hem de küçük ve orta ölçekli üretim ortamında sistem esnekliğinin artırılmasına yönelik bir üretim yaklaşımıdır [2]. Hücresele üretim sistemleri benzer parça ailelerinin kendilerine has atanmış olan makine ortamlarında üretilme esasına dayanmaktadır. Bu şekilde herhangi bir değişim anında tüm sistemin değiştirilmesine gerek kalmadan ilgili alanda değişime imkân sağlanmaktadır.

Hücresele üretim sistemi kavramı orta hacimlerde üretim yapan ve benzer iş akışlarından oluşan üretim sistemlerinin içine uygulanarak sistem verimliliği artırılabilir ve çeşitli maliyet kalemlerinde kazançlar elde edilebilir. Hücrelerin tasarımı konusu genellikle üretim özellikleri yakın olan parçaların ve bu parçalara ilişkin makinelerin gruplandırılması ile ilgilenmektedir. Üretim verileri ve işlem karakteristikleri gibi birçok faktörün dikkate alınması gerekliliği nedeniyle hücresele üretim sistemlerinin tasarımı karmaşıktır [1]. Ancak, doğru bir hücre tasarımı çalışmasıyla işlemlerin daha hızlı bir şekilde ve daha az maliyet ile gerçekleştirilmesi sağlanabilmektedir. Örneğin; hücresele üretim sistemine geçen bir çalışmada [3], böyle bir sisteme geçilmesi ile maliyetlerinin önceki kullanılan sistemdeki maliyetlere göre azaldığı görülmektedir [3]. Ayrıca, optimum hücre tasarımı, işlem süresi, malzeme taşıma maliyeti, işçilik maliyeti ve süreç içi stok miktarı gibi kalemlerin minimum olmasını sağlayabilmektedir [4].

Hücresele üretim sistemlerinin tasarımı ile ilgili literatürden bazı makaleler aşağıdaki gibidir: Srinivasan vd. [5], parça aileleri problemi için girdisi bir benzerlik katsayısı matrisi olan bir atama modeli sunmuşlardır. Shafer ve Rogers [6], hücre formasyon problemi için üç farklı durumu dikkate alan amaç programlama modelleri geliştirmişlerdir. Bu durumlar, bütünüyle yeni bir sistem kurmak ve yeni ekipmanlar almak, sistemi mevcut ekipmanları kullanarak yeniden düzenlemek ve sistemi mevcut ekipmanları ya da bazı yeni ekipmanları kullanarak yeniden düzenlemek şeklindedir. Adil vd. [7] çalışmalarında, yatırım ve operasyonel maliyetleri ve ayrıca makinelerin boşta kalma süresi, parça envanteri ve teslim tarihlerine göre parçaların erken veya geç bitirilmesi gibi bazı durumları da dikkate alarak karma tamsayılı bir matematik programlama modeli geliştirmişlerdir. Heragu ve Chen [8], kaynak kullanımı ve alternatif rotalama gibi durumları dikkate alan hücresele üretim sistemlerinin tasarımı problemi için matematik bir model önermişlerdir. Wang [9] çalışmasında, makine hücresi ve parça ailesi formasyonu için doğrusal bir atama algoritması sunmuştur. Öztürk ve Öztürk [10] çalışmalarında, makinelerin ve parçaların eş zamanlı olarak hücrelere atandığı hücre oluşturma problemini çözmek için bir yapay sinir ağı yaklaşımı önermişlerdir. Prabhakaran vd. [11] toplam hücre yük değişimini ve toplam hücreler arası hareketleri minimum yapma amaçlı makine gruplama problemini ele almışlardır. Defersha ve Chen [12], dinamik hücre konfigürasyonu, alternatif rotalama, operasyon sıralaması, makine kapasitesi, hücreler arasında iş yükünün dengelenmesi, operasyon maliyeti, taşeron maliyeti, takım maliyeti, hazırlık maliyeti ve hücre büyüklüğü limiti gibi çeşitli faktörleri dikkate alan hücresele üretim sistemlerinin tasarımı problemi için bir matematik programlama modeli geliştirmişlerdir.

Oztürk vd. [13] makinelerin ve parçaların aynı anda hücrelere atanmasını sağlayan bir yapay sinir ağı yaklaşımı önererek bu yaklaşımlarını literatürden bazı veri setlerinden faydalanarak genetik algoritma, tabu arama, tavlama benzetimi gibi bazı tekniklerle karşılaştırmışlardır. Mahdavi vd. [14], hücre kullanımı kavramına dayalı hücre formasyon problemi için bir matematik model önermişlerdir. Ameli ve Arkat [15], parçaların proses sıralarını ve üretim hacimlerini dikkate alarak makine hücrelerinin konfigürasyon problemini ele almışlardır. Ayrıca, makine güvenilirliği ve parça türleri için alternatif proses rotalarını ele alarak doğrusal bir tamsayı programlama modeli geliştirmişlerdir. Fan ve Feng [16], hücreler arası ve hücreler içi malzeme maliyeti, makine yer değiştirme maliyeti, işçi çalıştırma süresi ve işçi maaşı gibi kalemleri ele alarak doğrusal olmayan karma tamsayılı programlama modeli geliştirmişlerdir. Raminfar vd. [2] hücresele üretim sistemleri için hücre formasyon ve üretim planlama problemlerini aynı anda çözmek için bir dinamik deterministik matematik model sunmuşlardır. Bu modelin amacı hücreler arası malzeme taşıma maliyetini, makine işletme maliyetini, hazırlık maliyetini ve parça stok maliyetini minimum yapmaktır. Erenay vd. [17] çalışmalarında, katmanlı bir hücresele sistemi dikkate alarak stokastik bir hücresele tasarım konusuna yönelmişlerdir. Paydar ve Saidi-Mehrabad [18] çalışmalarında, sanal üretim hücrelerinin tasarımında müşteri talepleri ve makine kapasiteleri gibi kritik parametreleri göz önünde bulundurarak tedarik, üretim ve dağıtım planlamasının entegrasyonu için iki amaçlı olasılıksal optimizasyon matematik programlama modeli geliştirmişlerdir. Rafiei vd. [19]'nin çalışmalarında, hücreler arası hareketler için yığın büyüklüklerinin optimize edilmesini dikkate alan dinamik bir hücresele üretim sisteminin tasarlanması problemi ele alınmaktadır. Makine satın alma, operasyon, hücreler arası hareketler, makinelerin transfer edilmesi gibi durumların maliyetinin minimum yapılması ve proses içi envanterin minimum yapılması şeklinde amaç fonksiyon kalemlerini içeren iki amaçlı karma tamsayılı doğrusal olmayan bir programlama modeli önerilmiştir. Aghajani vd. [20]'nin çalışmalarında, kanban mekanizması tarafından kontrol edilen hücresele üretim sistemleri incelenmiş olup kusur oranları, elde bulundurma maliyeti, hazırlık maliyeti gibi kalemlerin toplam sistem maliyetine olan etkisi değerlendirilerek parçacık sürü optimizasyonu, tavlama benzetimi gibi meta sezgisel algoritmalar önerilmiştir. Alhourani [21] çalışmasında, makine kapasitesi, makine güvenilirliği ve makine çoğaltılması gibi durumları değerlendirerek uygun makine gruplanması ve toplam maliyetin minimizasyonu problemini ele almıştır.

Aljuneidi ve Bulgak [22], etkin bir geri dönüşüm ve yeniden üretim ağı için yeniden konfigüre edilebilir hücresele üretim sistemlerinin ve hibrid üretim-yeniden üretim sistemlerinin eş zamanlı bir incelemesini

sunmuşlardır ve sürdürülebilir üretim sistemleri için tasarım optimizasyonu, analizi ve süreç planlama durumları için bütünlük bir yaklaşım önermişlerdir. Feng vd. [23], işçi atama ve hücre formasyon problemlerini birlikte dikkate alarak makinelerin, parçaların ve işçilerin optimum yerleşimi için doğrusal bir model önermişlerdir. Kazemi vd. [24], parçaların işlenmesi, hücreler arası hareketler, makinelerin kurulumu / kaldırılması ve üretim kaybı gibi çeşitli durumların maliyetlerini göz önünde bulunduran dinamik hücresele üretim sistemlerinin tasarımı konusuna karma tamsayılı lineer olmayan bir matematik programlama modeli önermişlerdir. Sadeghi vd. [25] çalışmalarında, hücre formasyonu, operatör ataması ve hücreler arası yerleşim konularını aynı anda çözmek için bir matematik programlama modeli geliştirmişlerdir. Soolaki ve Arkat [26]'ın hücre tasarımı çalışmasında ürünlerin üretim süreci ve uygun tesis yeri seçimi için coğrafik olarak dağıtılmış bir tasarım önerilmiştir. Feng vd. [27] çalışmalarında, bütünlük olarak hücre tasarım ve yerleşim problemini incelemişlerdir. Bu nedenle, amaç fonksiyonu, malzeme taşıma, operasyon ve taşeronla yaptırma maliyetlerinden oluşan karma tamsayılı doğrusal programlama modeli geliştirilmiş olup üretim planlama, alternatif rotalama ve makine çoğaltımı gibi tasarım kriterleri dikkate alınmıştır. Maleki vd. [28] çalışmalarında, hücresele teknoloji içerisinde makinelerin ve parçaların gruplandırılması problemi için çok amaçlı bir matematik programlama modeli geliştirmişlerdir. Geliştirilen bu modelde, hem hücreler içi ve hücreler arası taşıma maliyetinin minimum yapılması hem de makinelerin yeri bakımından hücrelere parçaların atanmasının öneminin maksimum yapılması dikkate alınmaktadır. Her hücre için her parçanın ağırlığı analitik hiyerarşi prosesi ile belirlenmektedir. Mahmoodian vd. [29] çalışmalarında, hücresele üretim tasarım problemi için parçacık sürü optimizasyon algoritmasını ve sınır ağlarını içeren bir yaklaşım geliştirmişlerdir. Shashikumar vd. [30] çalışmalarında, hücre tasarım problemi için genetik algoritma ve üyelik indeksi ile birlikte bazı sezgisel teknikleri de içeren bütünlük bir yaklaşım geliştirmişlerdir. Sezgisel teknikler, genetik algoritma için başlangıç popülasyonunun belirlenmesinde kullanılırken, genetik algoritma hücrelere makine atanma sonuçlarının en iyilenmesinde, üyelik indeksi ise hücrelere parçaları atamada kullanılmaktadır.

Bu çalışmada, en uygun hücre tasarımını belirlemek için matematik programlama modeli geliştirilmektedir. Toplam maliyeti minimum yapmayı hedefleyen programın amacında üretim maliyetleri, makinelerin hazırlık maliyetleri, makinelerin bakım maliyetleri ve personel maliyetleri dikkate alınmaktadır. Geliştirilen modelde, makinelerin kapasiteleri, hücreyi oluşturmak için gerekli olan minimum makine sayısı, her bir parça için en az kaç işlem göreceği ve parçaların işlem göremeyeceği makineler gibi çeşitli kısıtlar

söz konusudur. Çalışmada optimum hücre tasarımına göre makinelerin hangi hücrelere atandığı ve parçaların hangi makinelerde işlendiği optimum toplam maliyet ile birlikte görülebilmektedir.

II. MATERYAL VE METOT

Bu çalışmada, tamsayılı bir matematik model geliştirilmiş olup aşağıda indisleri, karar değişkenleri, parametreleri, amaç fonksiyonu ve kısıtları detaylı olarak yer almaktadır:

İndisler

i	parça indisi	$i: 1, \dots, I$
m	makine indisi	$m: 1, \dots, M$
h	hücre indisi	$h: 1, \dots, H$

Parametreler

n_m :	m türünden makinelerin sayısı
Mx_m :	m . makinenin para birimi cinsinden bakım maliyeti
l_{hm} :	h . hücreye atanan m . makinenin hücre içerisindeki hazırlık maliyeti
k_m :	m . makinenin kapasitesi
lt :	hücresinin açılması için gereken minimum makine sayısı
o_m :	m türünden makine için gereken personel sayısı
$pers$:	personel maliyeti
c_{im} :	i . parçanın m . makinedeki birim yapılma maliyeti
t_{im} :	i . parçanın m . makinedeki birim yapılma süresi
d_i :	i . parçaya dair gelen talep
$enaz_i$:	parçaların en az kaç makinede işlenmesi gerektiğini gösteren tamsayı
$encok_i$:	parçaların en çok kaç makinede işlenmesi gerektiğini gösteren tamsayı
E :	bazı makinelerde işlem göremeyeceği belirtilen parçaların kümesi
F :	belirtilen parçaları işleyemeyen makinelerin bulunduğu küme
WW :	çok büyük pozitif bir tamsayı

Karar Değişkenleri

$$prtmcn_{ihm} = \begin{cases} 1, & i. \text{ parça } h. \text{ hücredeki } m. \text{ makineye atanırsa} \\ 0, & \text{aksi halde} \end{cases}$$

$$cellmcn_{hm} = \begin{cases} 1, & h. \text{ hücreye } m. \text{ makine atanırsa} \\ 0, & \text{aksi halde} \end{cases}$$

Amaç Fonksiyonu

$$\text{Min} \left(\sum_h \sum_m cellmcn_{hm} l_{hm} n_m + \sum_h \sum_m cellmcn_{hm} Mx_m n_m + \sum_i \sum_h \sum_m prtmcn_{ihm} t_{im} d_i c_{im} + \sum_h \sum_m cellmcn_{hm} o_m \cdot pers \right) \quad (1)$$

Eşitlik (1)'de toplam maliyeti minimum yapan amaç fonksiyonu formülasyonu sunulmaktadır. Bu fonksiyonun ilk kaleminde makinelerin hazırlık

maliyeti, ikinci kaleminde makinelerin bakım maliyeti, üçüncü kaleminde üretim maliyeti ve dördüncü kaleminde personel maliyeti yer almaktadır.

Kısıt Denklemleri

Eşitlik (2), tüm sistemde toplam makinelerin kapasitesinin gelen talebi karşılamak için en az gelen talep kadar olmasını sağlayan denklemdir. Diğer bir ifade ile bu kısıt ile talebin kapasiteyi aşmaması sağlanmaktadır.

$$\sum_h^H \sum_m^M cellmcn_{hm}.k_m.n_m \geq \sum_i^I \sum_h^H \sum_m^M prtmcn_{ihm}.t_{im}.d_i \quad (2)$$

Eşitlik (3), bir hücreye atanan makine varsa o makineye parça atanmasını sağlayan kısıt denklemdir.

$$\sum_i^I prtmcn_{ihm} \leq cellmcn_{hm}.WW \quad , \forall h, \forall m \quad (3)$$

Eşitlik (4), hücrelerin açılabilmesi için hücrelerin içermesi gereken minimum makine sayısını gösteren denklemdir.

$$\sum_m^M cellmcn_{hm} \geq lt \quad , \forall h \quad (4)$$

Eşitlik (5), her makine türünün en fazla sayısı kadar hücreye atanabileceğini gösteren kısıttır.

$$\sum_h^H cellmcn_{hm} \leq n_m \quad , \forall m \quad (5)$$

Eşitlik (6), parçaların en az kaç makinede işlenmesi gerektiğini gösteren kısıt denklemdir.

$$\sum_h^H \sum_m^M prtmcn_{ihm} \geq enaz_i \quad , \forall i \quad (6)$$

Eşitlik (7), parçaların en fazla kaç makinede işlenmesi gerektiğini gösteren kısıt denklemdir.

$$\sum_h^H \sum_m^M prtmcn_{ihm} \leq encok_i \quad , \forall i \quad (7)$$

Eşitlik (8), hangi parçaların hangi makinelerde işlem göremeyeceğini belirten kısıt denklemdir.

$$prtmcn_{ihp} + prtmcn_{ihq} = 0 \quad , \forall r, r \in E, \forall h, \forall p, \forall q, p, q \in F \quad (8)$$

Eşitlik (8)'e göre, örneğin; parça 1'in makine 3 ve makine 5'te işlem göremeyeceğinin belirtilmesi

durumunda bu kısıt denklemini şu şekilde oluşturmaktadır:
 $prtmcn_{1h3} + prtmcn_{1h5} = 0 \quad , \forall h$

Eşitlikler (9) ve (10), karar değişkenlerinin ikili tamsayı olduğunu göstermektedir.

$$prtmcn_{ihm} \in \{0,1\} \quad , \forall i, \forall h, \forall m \quad (9)$$

$$cellmcn_{hm} \in \{0,1\} \quad , \forall h, \forall m \quad (10)$$

III. BULGULAR

3.1 Geliştirilen Modelin Girdileri

Geliştirilen matematik programlama modeli için geliştirilen örnek problemde 5 farklı parça ve 2 farklı hücre dikkate alınmaktadır. Ayrıca, sistemde 9 farklı türde olmak üzere toplamda 11 makine ele alınmıştır. Sisteme gelen parça talepleri ise şu şekildedir: Parça1 için 810, parça2 için 650, parça3 için 750, parça4 için 800 ve parça 5 için 950 parçadır. Bunlardan başka, bir hücrenin açılması için gereken minimum makine sayısı 2, personel maliyeti 2000 para birimi ve WW çok büyük bir pozitif tamsayı (1000000) olarak tanımlanmıştır. Tablo 1'de sistemdeki makineler ile ilgili girdi parametreleri yer almaktadır. Tablo 2, parçaların makinelerdeki para birimi cinsinden yapılma maliyetlerini göstermektedir. Tablo 3'te parçaların makinelerdeki yapılma süreleri yer alırken Tablo 4'te ise hücrelerde yer alan makinelerin para birimi cinsinden hazırlık maliyetleri toplamı görülmektedir. Tablo 5'te parçaların en az ve en fazla işlem görebilecekleri makine sayıları yer almaktadır. Ayrıca, Tablo 6'da bazı parçalar için işlem göremeyecekleri makine türleri sunulmaktadır.

Tablo 1. Makineler için girdi parametreleri

Makine türü	Makine türü sayısı	Gereken personel sayısı	Makine bakım maliyeti (para birimi)	Makine kapasitesi (saat)
Makine1	2	1	9850	1250
Makine2	1	2	10700	1100
Makine3	1	1	21950	1400
Makine4	1	1	10500	1350
Makine5	1	3	35060	1500
Makine6	1	1	12950	1850
Makine7	2	1	25020	1100
Makine8	1	1	11500	1000
Makine9	1	1	15000	1150

Tablo 2. Parçaların makinelerdeki para birimi olarak yapılma maliyetleri

Makine türü	Parça 1	Parça 2	Parça 3	Parça 4	Parça 5
Makine 1	5	4	2	5	3
Makine 2	7	6	4	7	6
Makine 3	9	5	3	6	4
Makine 4	11	2	2	4	2
Makine 5	8	7	6	6	7
Makine 6	7	3	5	8	3
Makine 7	7	5	6	9	8
Makine 8	9	6	9	7	6
Makine 9	10	9	7	8	10

Tablo 3. Parçaların makinelerdeki saat cinsinden yapılma süreleri

Makine türü	Parça 1	Parça 2	Parça 3	Parça 4	Parça 5
Makine 1	0,34	0,68	0,98	0	0,72
Makine 2	0,91	0,97	0,97	0,97	0,65
Makine 3	0	0	0,83	0,89	0,90
Makine 4	0,79	0,77	0	0,52	0,77
Makine 5	0	0,52	0,88	0,58	0,84
Makine 6	0,81	0,77	0,97	0,67	0,54
Makine 7	0,75	0,80	0,85	0,89	0,85
Makine 8	0,80	0,66	0	0,77	0,87
Makine 9	0,85	0,90	0	0,69	0,87

Tablo 4. Hücrelerdeki makinelerin para birimi olarak hazırlık maliyetleri toplamı

Makine türü	Hücre1	Hücre2
Makine1	1100	1200
Makine2	1600	1400
Makine3	1150	1250
Makine4	1120	1410
Makine5	1250	1500
Makine6	1380	1140
Makine7	1400	1150
Makine8	1500	1800
Makine9	1800	1500

Tablo 5. Parçaların en az ve en fazla işlem görebilecekleri makine sayısı

Parça türü	En az işlem görebileceği makine sayısı	En fazla işlem görebileceği makine sayısı
Parça1	3	7
Parça2	4	8
Parça3	3	6
Parça4	4	7
Parça5	2	5

Tablo 6. Parçaların işlem göremeyecekleri makine türleri

Parça türü	İşlem göremeyeceği makine türü
Parça1	Makineler 3 ve 5
Parça2	Makine 3
Parça3	Makineler 4, 8 ve 9
Parça4	Makine 1

3.2 Geliştirilen Modelin Sonuçları

Dikkate alınan bu problemin çözümü için GAMS 23.5 optimizasyon programı kullanılmıştır. Bu problem, Intel(R) Core(TM) i5 CPU @ 2.53GHz, 2.53GHz işlemcili ve 8GB RAM'i olan bir bilgisayarda 1 saniyeden daha kısa bir sürede çözümlenmektedir. Problemin minimum toplam maliyeti 147872,20 para birimi olarak elde edilmiştir. Tablo 7'de açılacak olan iki hücreye hangi makinelerin atandığı görülmektedir. Tablo 8'de ise bu hücrelerdeki hangi makinelere hangi parçaların atandığı yer almaktadır.

Tablo 7. Hücelere makinelerin atanması

Makine türü	Hücre1	Hücre2
Makine1	1	1
Makine2	0	1
Makine3	0	0
Makine4	1	0
Makine5	0	0
Makine6	1	0
Makine7	0	0
Makine8	0	1
Makine9	0	0

Tablo 8. Hücrelerdeki makinelere parçaların atanması

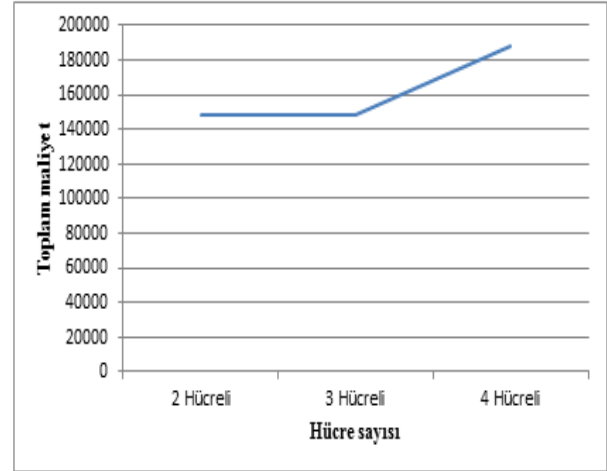
	Makine Numarası								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Parça1/ Hücre1	1	0	0	0	0	1	0	0	0
Parça1/ Hücre2	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Parça2/ Hücre1	1	0	0	1	0	1	0	0	0
Parça2/ Hücre2	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Parça3/ Hücre1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Parça3/ Hücre2	1	1	0	0	0	0	0	0	0
Parça4/ Hücre1	0	0	0	1	0	1	0	0	0
Parça4/ Hücre2	0	1	0	0	0	0	0	1	0
Parça5/ Hücre1	1	0	0	0	0	1	0	0	0
Parça5/ Hücre2	0	0	0	0	0	0	0	0	0

3.3 Duyarlılık Analizi

Bu çalışmada, duyarlılık analizi için hücre sayısının değiştirilmesiyle toplam maliyetin nasıl etkileneceği görülebilmektedir. Tablo 9'da ve Şekil 1'de görüldüğü gibi hücre sayısının artırılması ile toplam maliyet artmaktadır.

Tablo 9. Hücre sayısının değişiminin toplam maliyete olan etkisi

	2 Hücreli	3 Hücreli	4 Hücreli
Maliyet (para birimi)	147872,20	148053,20	188540,70

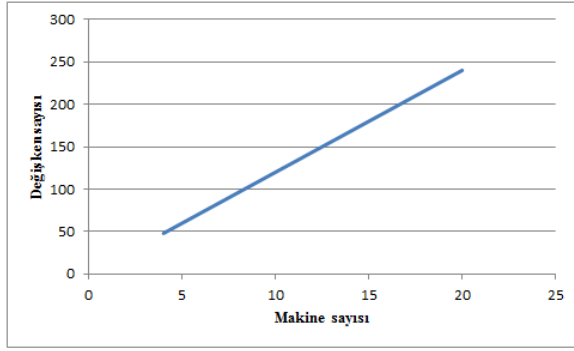
**Şekil 1.** Hücre sayısının değişiminin toplam maliyete olan etki grafiği

3.4 Hesaplama Karmaşıklığı Analizi

Bu analiz, modele girilen indislerin modelin değişkenlerinin sayısı üzerindeki etkisini göstermektedir. Bu çalışmanın karar değişkenlerini gösteren Tablo 10'da da görüldüğü gibi makine sayısı, hücre sayısı ve parça sayısı arttıkça analize dair karmaşıklık artabilmektedir. İncelenen probleme dair parça sayısı 5, makine sayısı 11 ve hücre sayısı 2 olarak alındığı için değişken sayısı 132 olmaktadır. Bu analizin etkisini göstermek açısından, örneğin sadece makine sayısının değişiminin toplam değişken sayısı üzerindeki etkisi Şekil 2'de yer almaktadır.

Tablo 10. Çalışmanın modelinin değişken sayısı

Değişkenler	Parça (i)	Makine (m)	Hücre (h)	Toplam
$prtmcn_{ihm}$	i	m	h	imh
$cellmcn_{hm}$		m	h	mh
Toplam				mh(i+1)



Şekil 2. Makine sayısındaki değişiminin toplam değişken sayısına olan etkisi

IV. SONUÇLAR

Günümüzde teknolojideki sürekli gelişim ve dolayısıyla artan rekabet ortamı nedeniyle sistemlerin kendilerini geliştirmesi ve güncellemesi artık bir zorunluluk olarak ortaya çıkmaktadır. Bu zorunluluktan doğan sistemlerden birisi de hücresele üretim sistemleridir. Bu makalede, toplam tasarım maliyetini optimum yapan bir matematik programlama modeli sunulmaktadır. Çalışmanın hedef fonksiyonu olan toplam tasarım maliyeti, üretim maliyeti, makinelerin hazırlık maliyeti, makinelerin bakım maliyeti ve personel maliyeti unsurlarından oluşmaktadır. Ayrıca, önerilen matematik programlama modeli, makinelerin kapasiteleri, hücreleri oluşturmada gereken minimum makine sayısı, her makine türünün en fazla atanabileceği hücre sayısı, parçaların en az ve en fazla kaç makinede işlem görebileceği ve parçaların hangi makinelerde işlem göremeyeceği gibi çeşitli kısıtları dikkate almaktadır. GAMS optimizasyon programı kullanılarak önerilen matematik programlama modelinin çözüm sonuçları, duyarlılık analizi ve ayrıca hesaplama karmaşıklığı analizi makalede sunulmaktadır. Bu çalışma, hücresele üretim sistemlerinde dinamik bir ortam yapısı dikkate alınarak geliştirilebilir. Diğer bir ifade ile gelecek çalışma alanları olarak, parçaların talepleri ile ilgili değişimler veya makinelerde parçaların yapılma süreleri gibi bazı parametrelerin stokastik olduğu durumlar dikkate alınarak hücre tasarım çalışması yapılabilir. Ayrıca, çalışmanın hesaplama karmaşıklığı analizinde modeldeki indislerin sayılarının değişiminin toplam değişken sayısı üzerindeki etkisi sunulmaktadır. Dolayısıyla, incelenen problemin boyutu genişletildiğinde çözüm yöntemi olarak meta-sezgisel yöntemler de sunulabilir. Son olarak, bu çalışmaya diğer maliyet kalemleri gibi bazı faktörler de dâhil edilerek çalışmanın gerçek bir problem üzerinde uygulanması yapılabilir.

KAYNAKLAR

[1] Luong, L., He, J., Abhary, K., & Qiu, L., (2002). A Decision Support System for Cellular Manufacturing System Design. *Computers & Industrial Engineering*, 42(2-4), 457-470.

[2] Raminfar, R., Zulkifli, N., Vasili, M., & Hong, T.S., (2013). An Integrated Model for Production Planning and Cell Formation in Cellular Manufacturing Systems. *Journal of Applied Mathematics*, 10 pages.

[3] Imran, M., Kang, C., Lee, Y.H., Jahanzaib, M., & Aziz, H., (2017). Cell Formation in a Cellular Manufacturing System Using Simulation Integrated Hybrid Genetic Algorithm. *Computers & Industrial Engineering*, 105, 123-135.

[4] Hazarika, M., & Laha, D., (2018). Genetic Algorithm Approach for Machine Cell Formation with Alternative Routings. *Materials Today: Proceedings*, 5(1), 1766-1775.

[5] Srinivasan, G., Narendran, T.T., & Mahadevan, B., (1990). An Assignment Model for the Part-families Problem in Group Technology. *International Journal of Production Research*, 28(1), 145-152.

[6] Shafer, S.M., & Rogers, D.F., (1991). A Goal Programming Approach to the Cell Formation Problem. *Journal of Operations Management*, 10(1), 28-43.

[7] Adil, G.K., Rajamani, D., & Strong, D., (1993). A Mathematical Model for Cell Formation Considering Investment and Operational Costs. *European Journal of Operational Research*, 69(3), 330-341.

[8] Heragu, S.S., & Chen, J.-S., (1998). Optimal Solution of Cellular Manufacturing System Design: Benders' Decomposition Approach. *European Journal of Operational Research*, 107(1), 175-192.

[9] Wang, J., (2003). Formation of Machine Cells and Part Families in Cellular Manufacturing Systems Using a Linear Assignment Algorithm. *Automatica*, 39(9), 1607-1615.

[10] Öztürk, G., & Öztürk, Z.K., (2005). A Competitive Neural Network Approach to Manufacturing Cell Formation. *Proceedings of the 35th International Conference on Computers & Industrial Engineering*, Istanbul, Turkey, June 19-22, 1549-1554.

[11] Prabhakaran, G., Muruganandam, A., Asokan, P., & Girish, B.S., (2005). Machine Cell Formation for Cellular Manufacturing Systems Using an Ant Colony System Approach. *Int J Adv Manuf Technol*, 25, 1013-1019.

[12] Defersha, F.M., & Chen, M., (2006). A Comprehensive Mathematical Model for the Design of Cellular Manufacturing Systems. *International Journal of Production Economics*, 103(2), 767-783.

[13] Ozturk, G., Ozturk, Z.K., & Islier, A.A., (2006). A Comparison of Competitive Neural Network with Other AI Techniques in Manufacturing Cell Formation. In: Jiao, L., Wang, L., Gao, X., Liu, J., Wu, F. (eds.), *Advances in Natural Computation, ICNC 2006, Lecture Notes in*

- Computer Science*, vol. 4221, Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 575-583.
- [14] Mahdavi, I., Javadi, B., Fallah-Alipour, K., & Slomp, J., (2007). Designing a New Mathematical Model for Cellular Manufacturing System Based on Cell Utilization. *Applied Mathematics and Computation*, 190(1), 662-670.
- [15] Ameli, M.S.J., & Arkat, J., (2008). Cell Formation with Alternative Process Routings and Machine Reliability Consideration. *Int J Adv Manuf Technol*, 35(7-8), 761-768.
- [16] Fan, J., & Feng, D., (2013). Design of Cellular Manufacturing System with Quasi-dynamic Dual Resource Using Multi-objective GA. *International Journal of Production Research*, 51(14), 4134-4154.
- [17] Erenay, B., Suer, G.A., Huang, J., & Maddisetty, S., (2015). Comparison of Layered Cellular Manufacturing System Design Approaches. *Computers & Industrial Engineering*, 85, 346-358.
- [18] Paydar, M.M., & Saidi-Mehrabad, M., (2015). Revised Multi-choice Goal Programming for Integrated Supply Chain Design and Dynamic Virtual Cell Formation with Fuzzy Parameters. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 28(3), 251-265.
- [19] Rafiei, H., Rabbani, M., Nazaridoust, B., & Ramiyani, S.S., (2015). Multi-objective Cell Formation Problem Considering Work-in-process Minimization. *Int J Adv Manuf Technol*, 76(9-12), 1947-1955.
- [20] Aghajani, M., Keramati, A., Tavakkoli-Moghaddam, R., & Mirjavadi, S.S., (2016). A Mathematical Programming Model for Cellular Manufacturing System Controlled by Kanban with Rework Consideration. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 83(5-8), 1377-1394.
- [21] Alhourani, F., (2016). Cellular Manufacturing System Design Considering Machines Reliability and Parts Alternative Process Routings. *International Journal of Production Research*, 54(3), 846-863.
- [22] Aljuneidi, T., & Bulgak, A.A., (2017). Designing a Cellular Manufacturing System Featuring Remanufacturing, Recycling, and Disposal Options: A Mathematical Modeling Approach. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 19, 25-35.
- [23] Feng, H., Da, W., Xi, L., Pan, E., & Xia, T., (2017). Solving the Integrated Cell Formation and Worker Assignment Problem Using Particle Swarm Optimization and Linear Programming. *Computers & Industrial Engineering*, 110, 126-137.
- [24] Kazemi, M., Gol, S.S., Tavakkoli-Moghaddam, R., Kia, R., & Khorrami, J., (2017). A Mathematical Model for Assessing the Effects of a Lot Splitting Feature on a Dynamic Cellular Manufacturing System. *Production Engineering*, 11(4-5), 557-573.
- [25] Sadeghi, S., Forghani, M.A., & Seidi, M., (2017). Integrated Dynamic Cell Formation with Operator Assignment and Inter-cell Layout Problems: A Mathematical Model. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 231(9), 1658-1669.
- [26] Soolaki, M., & Arkat, J., (2018). Incorporating Dynamic Cellular Manufacturing into Strategic Supply Chain Design. *Int J Adv Manuf Technol*, 95(5-8), 2429-2447.
- [27] Feng, H., Xi, L., Xia, T., & Pan, E., (2018). Concurrent Cell Formation and Layout Design Based on Hybrid Approaches. *Applied Soft Computing*, 66, 346-359.
- [28] Maleki, R., Ketabi, S., & Rafiei, F.M., (2018). Grouping Both Machines and Parts in Cellular Technology by Genetic Algorithm. *Journal of Industrial and Production Engineering*, 35(2), 91-101.
- [29] Mahmoodian, V., Jabbarzadeh, A., Rezazadeh, H., & Barzinpour, F., (2019). A Novel Intelligent Particle Swarm Optimization Algorithm for Solving Cell Formation Problem. *Neural Comput & Applic*, 31(2), 801-815.
- [30] Shashikumar, S., Raut, R.D., Narwane, V.S., Gardas, B.B., Narkhede, B.E., & Awasthi, A., (2019). A Novel Approach to Determine the Cell Formation Using Heuristics Approach. *OPSEARCH*, 56, 628-656.

PT-/non-PT-Symmetric and non-Hermitian q-deformed Trigonometric Scarf Potential via Path Integral Method

Path Integral Yöntemiyle PT-/ PT-Simetrik ve Hermityen Olmayan q-deformasyonlu Trigonometrik Scarf Potansiyeli

Nalan KANDIRMAZ¹ 

¹Mersin Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, 33342, Mersin, Türkiye

Abstract

In this study, energy spectrum and corresponding wave function of Parity-Time (PT)-/non-PT- Symmetric and Non-Hermitian q-deformation Trigonometric Scarf Potential are obtained by using Path Integral method where P and T denotes parity and time operators, respectively. First, the kernel of this potential is derived in terms of the energy spectrum and the wave function by adopting parametric time. Then, the concomitant energy spectrum and the wave function are found by using the Green function stemming from the aforementioned kernel.

Keywords: Trigonometric Scarf Potential, Path integral, PT Symmetry, Non Hermitian potential, Green's Function

Öz

Bu çalışmada Parite-Zaman (PT)-/ PT-Simetrik ve Hermityen Olmayan q-deformasyonlu Trigonometrik Scarf Potansiyelinin enerji spektrumu ve karşılık gelen dalga fonksiyonu Path Integral yöntemi kullanılarak elde edilmiştir. P ve T burada parite ve zaman işlemcilerine karşılık gelmektedir. Öncelikle bu potansiyelin kerneli parametrik zaman kullanılarak enerji spektrumu ve dalga fonksiyonu cinsinden türetilmiştir. Daha sonra, bu kernelden elde edilen Green fonksiyonu ile enerji spektrumu ve dalga fonksiyonu bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler Trigonometrik Scarf Potansiyeli, Path integral, PT Simetri, Non Hermityen potansiyel, Green fonksiyonu

I. INTRODUCTION

It is the usual practice in quantum mechanics that any measurement of a physical quantity is expressible as an eigenvalue of an operator which is bound to be Hermitian. This common practice holds when there is no interaction with the environment i.e. when the system under scrutiny is isolated. In the presence of an interaction, the Hamiltonian is not Hermitian. However, although PT-symmetric systems are not isolated, they act as Hermitian systems because they are in equilibrium and their energy levels are real [1,2]. An example of such an open quantum system is George Gamow's work on Alpha decay. In this study, it was shown that a particle can escape from the nucleus by tunneling at a rate that can be effectively defined by a complex energy eigenvalue. It has been found that the real and imaginary portions of these eigenvalues are related to the experimentally observed energy levels and widths of the respective nuclear resonances. Non-Hermitian concepts have been used in physics, nuclear and quantum, optical, microwave, electronic and mechanical systems in a number of sub-disciplines [3,4].

The exact solutions of the Schrödinger equation with potentials yielding real and complex eigenvalues are quite interesting. Analytical and numerical studies for various Hamiltonians with real and complex eigenvalues, which were first initiated by Bender and Boetcher, and then were continued by many authors [2-4, 16-18]. Following this line of research, we aim to obtain the energy spectrum and the wave functions of the PT-/Non-PT-Symmetric and non-Hermitian Scarf Potential using Feynman's Path integral method in this work. The point of departure of the path integral method involves the calculation of the quantum mechanical amplitude over all possible paths associated with classical action, namely, the kernel [7].

Trigonometric Scarf potential has been used in the construction of a periodic potential and employed in one-dimensional crystal models in solid state physics. In this study, we will discuss the trigonometric Scarf potential based on q deformation. The hyperbolic potentials with q-deformation are defined as follows [9,12]:

$$\begin{aligned} \sinh_q x &= \frac{1}{2}(e^x - qe^{-x}), & \cosh_q x &= \frac{1}{2}(e^x + qe^{-x}) \\ \tanh_q x &= \frac{\sinh_q x}{\cosh_q x}, & \operatorname{sech}_q x &= \frac{1}{\cosh_q x} \\ \coth_q x &= \frac{\cosh_q x}{\sinh_q x}, & \operatorname{cosech}_q x &= \frac{1}{\sinh_q x} \\ \frac{d}{dx} \cosh_q x &= \sinh_q x, & \frac{d}{dx} \sinh_q x &= \cosh_q x \end{aligned} \quad (1)$$

Firstly, q deformation hyperbolic functions, which were introduced by Arai to obtain complete solutions of supersymmetric potentials, were later used by various authors for various potentials. The q parameter is used as an additional parameter to define interatomic interactions.

This paper is organized as follows: In section 2.1, we derive the kernel of PT-Symmetric and q -deformed Trigonometric Scarf potentials. In section 2.2, we obtain the energy eigenvalues and the corresponding wave functions. In section 3, we find kernel, energy spectrum and wave functions of non-PT Symmetric and non-Hermitian q deformed Trigonometric Scarf potential.

II. MATERIAL AND METHOD

The kernel of a point particle moving in the potential $V(x)$ in one dimension between the initial position x^{\wedge} at time $t^{\wedge}=0$ and final position x'' at time t'' has the following form [7]:

$$K(x'', t''; x', t') = \int \frac{Dx Dp}{2\pi} \exp\left\{\frac{i}{\hbar} \int dt [p\dot{x} - \frac{p^2}{2m} - V(x)]\right\} \quad (2)$$

This expression is the sum of the amplitudes that includes the contribution from all possible paths, which includes all the information about the system. The kernel, also called the propagator, is the Green function of the Schrodinger equation, and it is also anything that expresses a wave function that spreads over time. The kernel is defined as the energy integral of the Green function as

$$K(x'', x'; T) = \frac{1}{2\pi i \hbar} \int_{-\infty}^{\infty} e^{iET/\hbar} G(x'', x'; E) dE \quad (3)$$

Where $T = t'' - t'$. The time interval is divided into N parts and the kernel is expressed as the limit of the discrete time as follows

$$\begin{aligned} K(x'', x', T) &= \lim_{N \rightarrow \infty} \int \sum_{j=1}^N dx_j \prod_{j=1}^{N+1} \left(\frac{dp_j}{2\pi\hbar}\right) \exp\left\{\frac{i}{\hbar} \sum_{j=1}^{N+1} [p_j \Delta x_j \right. \\ &\quad \left. - \frac{p_j^2}{2m} - V(x_j)] \epsilon\right\} \end{aligned} \quad (4)$$

Here $\Delta x_j = x_j - x_{j-1}$, $\epsilon = t_j - t_{j-1}$, $t' = t_0 = t_a$, $t'' = t_N = t_b$. By using this expression, the kernel of

any potential is derived while the kernel of the system is derived by applying path integral method with the appropriate coordinate and momentum transformations. The energy spectrum and the Green's function of the system are found using Equation (3). In particular, the Fourier that analyzes the Propagator gives all the energy eigenvalues and each Fourier coefficient gives the wave functions of each energy. Propagator therefore contains all the dynamic information about a quantum system.

III. RESULTS

3.1. The Kernel of the PT-Symmetric and q -deformed Trigonometric Scarf potential

The q -deformed trigonometric Scarf potential in its most general form reads [14-16].

$$V(x) = -\frac{A}{\sinh_q^2 \alpha x} \quad (5)$$

If A is real and $\alpha \rightarrow i\alpha$, PT-Symmetric and q -deformed Trigonometric Scarf potential given by Equation (1) becomes

$$V(x) = \frac{A}{\sinh_q^2 \alpha x} \quad (6)$$

Through Equation (4), the above potential yields the following kernel

$$\begin{aligned} K(x'', x', T) &= \lim_{N \rightarrow \infty} \int \sum_{j=1}^N dx_j \prod_{j=1}^{N+1} \left(\frac{dp_j}{2\pi\hbar}\right) \exp\left\{\frac{i}{\hbar} \sum_{j=1}^{N+1} [p_j \Delta x_j \right. \\ &\quad \left. - \frac{p_j^2}{2m} - \frac{4Ae^{-2\alpha x_j}}{(1 + qe^{-2\alpha x_j})^2}] \epsilon\right\} \end{aligned} \quad (7)$$

By applying the position and momentum transformations below to the kernel above

$$x = \frac{1}{2\alpha} \ln \frac{\tanh^2 y}{q}, \quad p_x = a \operatorname{sinh}_q y P_y \quad (8)$$

Equation (7) now becomes

$$\begin{aligned} K(y_a, y_b; T) &= a \operatorname{sinh}_q y_b \operatorname{cosh}_q y_b \int Dy Dp_y \\ &\quad \times \exp \left[i \int dt \left(p_y \dot{y} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - a^2 \sinh^2 y \cosh^2 y \frac{p_y^2}{2\mu} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + 4A \sinh^2 y \cosh^2 y \right) \right] \end{aligned} \quad (9)$$

since position and momentum transformations yield the term $a \operatorname{sinh}_q y_b \operatorname{cosh}_q y_b$ due to the Jacobian.

A new time parameter is defined to eliminate the multiplier in front of the kinetic energy. To this aim, it is included into the kernel in the form of a Lagrange multiplier [9,10,19,20].

$$t = \frac{1}{\alpha^2} \int \frac{ds}{\sinh^2 y \cosh^2 y} \tag{10}$$

This new time parameter can also be expressed as the Fourier transform of the Delta function [7,8]

$$1 = \int dS \int \frac{dE}{2\pi} \frac{1}{\alpha^2 \sinh^2 y \cosh^2 y} \times \exp \left[i \left(ET - \int \frac{dsE}{\alpha^2 \sinh^2 y \cosh^2 y} \right) \right] \tag{11}$$

Here $S = S_b - S_a$. Using Equation (10) and Equation (11), we can perform the calculation in Equation (9) as

$$= \frac{1}{i \alpha \sinh y_b \cosh y_b} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{dE}{2\pi} e^{iET} \int Ds \int Dy Dp_y e^{i \frac{4A}{\alpha^2} S} \times \exp \left[i \int ds \left(p_y \dot{y} - \frac{p_y^2}{2\mu} - \frac{E}{2\alpha^2 \sinh^2 y} - \frac{E}{2\alpha^2 \cosh^2 y} \right) \right] K(y_b, y_a; T) \tag{12}$$

In order to make an equal contribution to the Jacobien at the beginning and end points, we need to symmetrize with respect to the points a and b . Having done this, we have

$$\frac{1}{\sinh y_b \cosh y_b} = \frac{1}{\sqrt{\sinh 2y_a \sinh 2y_b}} \exp \left(i \int_0^S ds i \frac{\cosh 2y}{\sinh 2y} \dot{y} \right) \tag{13}$$

Thus we can write Equation (12) as

$$K(y_b, y_a; T) = \int_0^{\infty} \frac{dE}{2\pi} e^{iET} \times \int Ds e^{i \frac{4A}{\alpha^2} S} \frac{1}{i \alpha \sqrt{\sinh 2y_a \sinh 2y_b}} K(y_b, y_a; S) \tag{14}$$

where

$$K(y_b, y_a; S) = \int Dy Dp_y \exp \left\{ i \int_0^S ds \left[p_y \dot{y} - \frac{p_y^2}{2\mu} - \frac{1}{2\mu} \left(\frac{\kappa(\kappa-1)}{\sinh^2 y} - \frac{\gamma(\gamma-1)}{\cosh^2 y} \right) - \frac{i p_y \cosh 2y}{\sinh 2y} \right] \right\} \tag{15}$$

The constants κ and λ are found equal and read

$$\kappa = \gamma = \frac{1}{2} \left[1 + \sqrt{1 + \frac{4\mu E}{\alpha^2}} \right] \tag{16}$$

We make use of the following relation [9,10,19,20] in Equation (10) as well as Equation (15)

$$\dot{y}_j \rightarrow \dot{y}_j \pm \frac{i \cosh 2y}{2\mu \sinh 2y} \quad \text{or} \quad \frac{y_j - y_{j-1}}{\epsilon} \rightarrow \frac{y_j - y_{j-1}}{\epsilon} \pm \frac{i p_y \cosh 2y}{2\mu \sinh 2y} \tag{17}$$

However, note that the term above vanishes in the $\epsilon \rightarrow 0$ limit so that Equation (15) becomes the kernel of the well-known Pöschl Teller potential [11,12]. Therefore, using the solutions of the Poschl Teller potential, we can directly write the solution of the PT-Symmetric and q-deformed Trigonometric Scarf potential as

$$= \sum_{n=0}^{\infty} \exp \left[-i \left(\frac{S}{2\mu} \right) (2n + \gamma - \kappa - 1)^2 \right] \Psi_n(y_a) \Psi_n^*(y_b) K(y_b, y_a; S) \tag{18}$$

Integrating over S to obtain the energy-dependent Green's function (see Equation (3)), we obtain

$$G(x_b, x_a; S) = \frac{1}{i \alpha \sqrt{\sinh 2y_a \sinh 2y_b}} \times \sum_{n=0}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{dE}{2\pi} \frac{e^{iET}}{(\kappa + \gamma - 2n)^2 - 1} \Psi_n(y_a) \Psi_n^*(y_b) \tag{19}$$

Using Green's function above, the kernel finally reads

$$K(x_b, x_a; E) = \sum_{n=0}^{\infty} e^{-iE_n T} \Psi_n(x_a) \Psi_n^*(x_b) = \sum_{n=0}^{\infty} \exp \left[-\frac{1}{8\mu \alpha q (n+1)^2} \right] \varphi_n(x_a) \varphi_n^*(x_b) \tag{20}$$

3.2. Energy Spectrum and Wave functions for PT-Symmetric q-deformed Trigonometric Scarf Potential

Integrating the kernel in Equation (20) over the action S and energy E , the energy eigenvalues are found as

$$E_n = -\frac{\alpha^2}{8\mu} \left(2n + 1 - \sqrt{\frac{8\mu A}{\alpha^2 q} + 1} \right)^2 \tag{21}$$

The normalized wave functions in terms of Jacobi polynomials [21] are given by

$$\varphi(x) = \frac{i}{2\sqrt{2}\sqrt{n+1}} \times \sqrt{4(n+1)^2 - (\gamma_n - \kappa_n)^2} \sqrt{\frac{\Gamma(n+1)\Gamma(-n-1)}{\Gamma(\kappa_n + n + \frac{1}{2})\Gamma(\gamma_n + n + \frac{1}{2})}} \times \frac{\exp(\kappa_n - \frac{1}{2})x/2\alpha}{(1 + e^{\frac{x}{\alpha}})^{(\kappa_n + \gamma_n - \frac{1}{2})}} P_n^{(\kappa_n - \frac{1}{2}, \gamma_n - \frac{1}{2})} \left(\frac{1 - e^{\frac{x}{\alpha}}}{1 + e^{\frac{x}{\alpha}}} \right) \quad (22)$$

where

$$\begin{aligned} \kappa_n &= \frac{1}{2} + \frac{1}{n+1} [(n+1)^2 - 2\mu\alpha^2 A], \\ \gamma_n &= \frac{1}{2} - \frac{1}{n+1} [(n+1)^2 - 2\mu\alpha^2 A] \end{aligned} \quad (23)$$

We see that PT symmetric q deformed Trigonometric Scarf potential has real energy eigenvalues as also verified in Ref. [12-15] through the direct calculation of the Schrödinger equation.

3.3. Non-PT-Symmetric and non-Hermitian q-deformed Trigonometric Scarf Potential

Non-PT-Symmetric and non-Hermitian q-deformed Trigonometric Scarf Potential can be determined by considering $A \rightarrow A + iB$ and $q \rightarrow iq$ and $\alpha \rightarrow i\alpha$. Following the similar steps in Sections (3.1) and (3.2), we obtain the energy eigenvalues and corresponding wave functions for the Non-PT-Symmetric and non-Hermitian q-deformed Trigonometric Scarf Potential. The discrete kernel for this potential reads

$$\begin{aligned} K(x'', x', T) &= \lim_{N \rightarrow \infty} \int \prod_{j=1}^N dx_j \prod_{j=1}^{N+1} \left(\frac{dp_j}{2\pi\hbar} \right) \exp\left\{ \frac{i}{\hbar} \sum_{j=1}^{N+1} [p_j \Delta x_j - \frac{p_j^2}{2m} \right. \\ &\left. - \frac{4(A + iB)e^{-2\alpha x_j}}{(1 + iq e^{-2\alpha x_j})^2}] \epsilon \right\}. \end{aligned} \quad (24)$$

By taking the appropriate coordinate and momentum transformations, we can rearrange the kernel as

$$\begin{aligned} K(y_a, y_b; T) &= i\alpha \sinh y_b \cosh y_b \int Dy Dp_y \\ &\times \exp \left[i \int dt \left(p_y \dot{y} \right. \right. \\ &\left. \left. + \alpha^2 \sinh^2 y \cosh^2 y \frac{p_y^2}{2\mu} \right. \right. \\ &\left. \left. + 4(A + iB) \sinh^2 y \cosh^2 y \right) \right] \end{aligned} \quad (25)$$

One now defines the parametric time as

$$t = \frac{1}{\alpha^2} \int \frac{ds}{\sinh^2 y \cosh^2 y} \quad (26)$$

in a similar manner as in section (3.2). If we follow the similar procedure in section (3.2), we obtain the energy eigenvalues of Non-PT Symmetric and non-Hermitian q-deformed Trigonometric Scarf Potential as

$$E_n = -\frac{\alpha^2}{8\mu} \left(2n + 1 - \sqrt{-\frac{8\mu(A + iB)}{\alpha^2 q} + 1} \right)^2 \quad (27)$$

The normalized wave functions are

$$\varphi(x) = \frac{i}{2\sqrt{2}\sqrt{n+1}} \times \sqrt{4(n+1)^2 - (\gamma_n - \kappa_n)^2} \sqrt{\frac{\Gamma(n+1)\Gamma(-n-1)}{\Gamma(\kappa_n + n + \frac{1}{2})\Gamma(\gamma_n + n + \frac{1}{2})}} \times \frac{\exp(\kappa_n - \frac{1}{2})ix/2\alpha}{(1 + e^{-\frac{x}{\alpha}})^{(\kappa_n + \gamma_n - \frac{1}{2})}} P_n^{(\kappa_n - \frac{1}{2}, \gamma_n - \frac{1}{2})} \left(\frac{1 - e^{-\frac{x}{\alpha}}}{1 + e^{-\frac{x}{\alpha}}} \right) \quad (28)$$

where κ_n and γ_n are given exactly as in Equation (22). Hence, the energy spectra is real only if $Re(A) = 0$. This expression is identical to that given in Ref. [16].

IV. CONCLUSIONS

In this study, we obtained the energy spectrum and the corresponding wave function of PT-/non-PT-Symmetric and non-Hermitian q-deformation Trigonometric Scarf Potential by using the Path Integral method. First of all, we derived the kernel of this potential using the method devised by Duru and Kleinert. We have defined parametric time in order to apply the path integral method and then derived the kernel in terms of the energy spectrum and wave function. We calculated the energy spectrum and wave function by using the Green function obtained from the kernel. In standard quantum mechanics, operators with real eigenvalues must be Hermitian. In this work, we provided an example where one can have real eigenvalues despite the underlying non-Hermiticity. The present study therefore sheds light on the structure of quantum theory and moreover can be used to understand the dynamics of the quantum mechanical systems interacting with the environment.

REFERENCES

[1] Bender C. M. and Boettcher S. (1998). Real Spectra in Non-Hermitian Hamiltonians Having PT Symmetry. Phys. Rev. Lett. 80, 5243.
 [2] Bender C.M. (2012). PT-symmetric quantum theory. Journal of Physics: Conference Series 63, 012002 .
 [3] Ganainy R.E, Makris G.K., Khajavikhan M, Musslimani Z.H., Rotter S.H. and Christodoulides D.N. (2018). Non-Hermitian

- physics and PT symmetry. *Nature Phys.* 14,11-19.
- [4] Makris K. G., Ganainy R. E. and Christodoulides D. N. (2008) Beam Dynamics in PT Symmetric Optical Lattices. *Phys.Rev.Lett.* 100, 103904.
- [5] Mostafazadeh A. (2002). Pseudo-Hermiticity versus PT-symmetry. II. A complete characterization of non-Hermitian Hamiltonians with a real spectrum. *J. Math. Phys.* 43, 2814.
- [6] L'evai G., Znojil M. (2000). Systematic search for PT symmetric potentials with real energy spectra. *J. Phys. A: Math. Gen.* 33 , 7165–7180.
- [7] Feynmann R. and Hibbs A. (2010). *Quantum Mechanics and Path Integrals*. Emended Edition, Dover Publications Inc. Mineola, New York, 371s.
- [8] Arai A. 1991). Exactly solvable supersymmetric quantum mechanics. *J. Math. Anal Appl.*, 158, 63-79.
- [9] Duru I.H., and Kleinert H.(1979). Solution of the path integral for the H-atom. *Phys. Lett.* B84, 185.
- [10] Duru I.H. (1983). Morse-potential Green's function with path integrals. *Phys. Rev. D*, 28, 2689.
- [11] Grosche C. (2005). Path integral solutions for deformed Poschl-Teller-like and conditionally solvable potentials. *J. Phys. A: Math. Gen.*, 38, 2947-2958.
- [12] Grosche C. (1989). Path integral solution of a class of potentials related to the Pöschl-Teller potential,. *J. Phys. A: Math. Gen.*, 22, 5073-5087.
- [13] Kandirmaz N. (2017). PT-/non-PT-Symmetric and Non-Hermitian Generalized Woods-Saxon Potential: Feynman Path Integral Approach *GU j Sci.*30(1), 133-138.
- [14] Yesiltas O. (2007). PT/Non-PT Symmetric and Non-Hermitian Poschl-Teller-Like Solvable Potentials via Nikiforov-Uvarov Method. *Phys. Scr.*, 75, 41-46.
- [15] Alvarez-Castillo D.E. and Kirchbach M. (2007). Exact spectrum and wave functions of the hyperbolic Scarf potential in terms of finite Romanovski polynomials. *Revista Mexicana de Fisica*, E53(2), 143-154.
- [16] Falaye, B. J. and Oyewumi, K. J. (2011). Solutions of the Dirac Equation with Spin and Pseudospin Symmetry for the Trigonometric Scarf Potential in D-dimensions. *AfricanReview of Physics* 6 (0025), 211–220.
- [17] Suparmi A., Cari C., Deta UA. et al. (2014). Exact Solution of Dirac Equation for q-Deformed Trigonometric Scarf potential with q-Deformed Trigonometric Tensor Coupling Potential for Spin and Pseudospin Symmetries Using Romanovski Polynomial. *Journal of Phys. Conference Series*,539(2014), 012004.
- [18] Arda A., Sever R. (2010). Effective-mass Klein-Gordon equation for non-PT/non-Hermitian generalized Morse potential. *Phys.Scr.*, 82(6), 065007.
- [19] Kandirmaz N., Sever R. (2009). Path Integral Solutions of PT-/Non-PT-Symmetric and Non-Hermitian Morse Potentials. *Chinese J. Phys.* 47,47.
- [20] Kandirmaz N., Sever R. (2011). Path Integral Solution of PT-/non-PT-Symmetric and non-Hermitian Hulthen Potential, *Acta Polytechnica*, 51, 1.
- [21] Gradshteyn, I. S., Ryzhik, I. M. (1981): *Table of Integrals, Series, and Products*, 2nd ed., Academic Press, New York, 1248s.

Structure, Microstructure, and Optical Properties of Tb Doped ZnO Nanorods

Tb Katkılı ZnO Nanoçubukların Yapı, Mikroyapı ve Optik Özellikleri

Adil GÜLER¹ 

¹Marmara University, Ataturk Faculty of Education, Department of Computer and Instructive Technology Teacher, 34722 Goztepe, Istanbul, Turkey

Abstract

The rare-earth-doped Zinc Oxides (ZnO) are significant materials, especially in photodetector technology, for high detection and high-speed optical communication. Here, important physical properties of Terbium-doped ZnO synthesized by the hydrothermal method were analyzed based on their concentration dependence. Structural behaviors of the nanorods were identified by the X-ray diffraction (XRD) technique and were figured out that $Zn_{1-x}Tb_xO$ samples were hexagonal Wurtzite structure with no secondary phase. The results of the structural behaviors were also proved by Rietveld analysis. The effect of Tb element in $Zn_{1-x}Tb_xO$ composition was clarified by calculating lattice parameters and cell volumes. To define the system better, microstructural parameters were provided by calculation. Scanning Electron Microscope images revealed random agglomeration. Due to the small amount of Tb increment in $Zn_{1-x}Tb_xO$ set, the desired elemental composition results were obtained in the nanorod sets (from $x=0$ to $x=0.05$ with the increment x rate of 0.01). By plotting $(F(R_\alpha) h\nu)^2$ versus $h\nu$, the bandgap energies of $Zn_{1-x}Tb_xO$ structures were determined, and the variation of E_g energies with increasing Tb dopant in the structures were discussed.

Keywords: Zinc oxide, hydrothermal method, diffuse reflectance spectroscopy, nanorods

Öz

Nadir toprak katkılı Çinko Oksitler (ZnO), fotodetektör teknolojisinde özellikle yüksek algılama ve yüksek hızlı optik iletişim için oldukça önemli malzemelerdir. Bu çalışmada, hidrotermal yöntemle sentezlenen Terbium katkılı ZnO'nun önemli fiziksel özellikleri, konsantrasyon bağımlılıklarına göre analiz edilmiştir. Nano çubukların yapısal davranışları, X-ışını kırınımı (XRD) tekniği ile tanımlanmış ve $Zn_{1-x}Tb_xO$ örneklerinin ikincil fazı olmayan altgen Wurtzite yapı olduğu tespit edilmiştir. Yapısal davranışların sonuçları, Rietveld analiziyle kanıtlanmıştır. Tb elementinin $Zn_{1-x}Tb_xO$ bileşiğindeki etkisi, kafes parametreleri ve hücre hacimleri hesaplanarak saptanmıştır. Yapıyı daha iyi tanımlamak için hesaplama yoluyla mikroyapısal parametreler elde edilmiştir. Taramalı Elektron Mikroskopu görüntüleri rastgele dağılımı ortaya çıkarmıştır. $Zn_{1-x}Tb_xO$ setindeki az miktardaki Tb artışına bağlı olarak, nano çubuk setleri ($x = 0$ ' dan $x = 0,05$ 'e kadar olan artışlarla) oldukça iyi elementsel kompozisyon sonuçları vermiştir. $(F(R_\alpha) h\nu)^2$ 'ye karşılık $h\nu$ 'ye göre, $Zn_{1-x}Tb_xO$ yapılarının bant aralığı enerjileri belirlendi ve yapılarıdaki artan Tb dopantına bağlı E_g enerjilerinin değişimi tartışıldı.

Anahtar Kelimeler: Çinko oksit, hidrotermal metot, dağıtımli yansıtma spektroskopisi, nano çubuklar

I. INTRODUCTION

The increasing demands on both energy and technological applications make the materials critical on their physical characteristics with new varying chemical combinations. Zinc oxide (ZnO), a well-known and widely used material with different dopant elements, still keeps the importance on varying miscellaneous properties depending on synthesizing conditions and dopant rates with different elements [1-8]. With the feature of wide band-gap (3.37 eV), semiconductor ZnO occupies a special place at detector technologies with the blue and UV spectral ranges and solid-state light sources [9 and the references therein]. Among the laser material technology, ZnO is one of the conventional material for creating laser diodes and UV light-emitting diodes with the property of 60 meV binding energy, which is higher than the existing binding energy of GaN (25 meV) [9]. The properties of high radiation, thermal and chemical resistance make ZnO a preferable material in the transparent contacts of solar cells. Besides these features, ZnO and its doped forms are used in acoustic, magnetic and electric, optic, cosmetic, and even nuclear applications [10-14].

Moreover, due to fast reset time, high response, photoconductive gain, and more effective area, ZnO-based photodetectors have an important role in commercial applications when compared to the conventional GaN [15-17] or SiC [18] photodetector technologies. In addition, to tailor the intrinsic physical properties such as electronic properties and luminescence, relevant doping elements and their rates in ZnO are essential for application prospects [19]. With the property of its special electron-shell structure, rare earth [RE] ions exhibit a better center by means of luminescence characteristics via their individual 4f electron transition at different energy levels [20 - 22]. It is expected that ZnO nanostructures doped with Tb should be applicable to both micro- and nano-optoelectronics. It is a general information and well known in the literature that the physical and chemical properties of doped-ZnO are heavily affected by the preparation conditions, the dopant rate, and dopant elements such as Cr, Co, Fe, V, Mg and Ni [1].

In the present work, the concentration-dependent Tb-doped ZnO samples in nanorod forms were synthesized through hydrothermal method and the structural and optical properties of the samples were analyzed. The results of the outcomes were correlated among the evaluated parameters.

II. MATERIALS AND METHODS

By hydrothermal method, the concentration-dependent Tb-doped ZnO nanorods were synthesized ($Zn_{1-x}Tb_xO$: $x=0.00, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04,$ and 0.05) and the used chemicals and preparation method were detailed in Ref. [23]. The possible phases at room temperature were defined by the XRD pattern by using a Rigaku Multiflex XRD instrument with monochromated $Cu K\alpha$ (1.5418\AA) source in the 2θ scan range of 20° to 80° . GSAS Rietveld analysis program was performed to match the obtained pattern and calculated analysis. By the tool of Scanning Electron Microscopy (SEM-EDX) Jeol-6390-LV, the surface morphologies of the samples were evaluated. A Perkin Elmer Spectrum Two FTIR-ATR spectrophotometer was used for defining Tb^{3+} doped ZnO and pure ZnO stretching vibrations. By diffuse reflectance attachments, the optical reflectance properties were defined of the samples by Shimadzu 2600 Plus UV-Spectrophotometer.

III. RESULTS AND DISCUSSIONS

3.1 Structural and morphological analysis

In the range of $20^\circ \leq 2\theta \leq 80^\circ$ degrees, XRD patterns of all samples were determined, and the all revealed peak positions in the XRD patterns were indexed without any secondary phase in Fig. 1 (a).

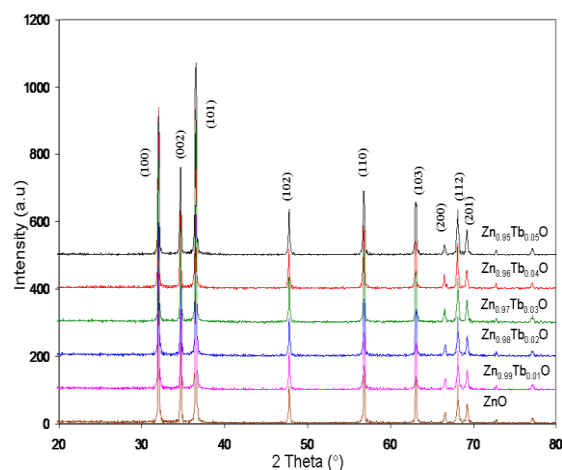


Fig. 1a X-ray diffraction of $Zn_{1-x}Tb_xO$ (from $x=0.00$ to 0.05 with 0.01 increment) samples.

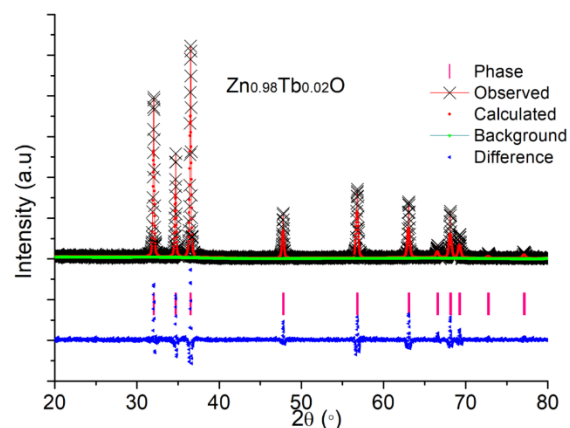


Fig. 1b The Rietveld analysis of $Zn_{0.98}Tb_{0.02}O$ sample.

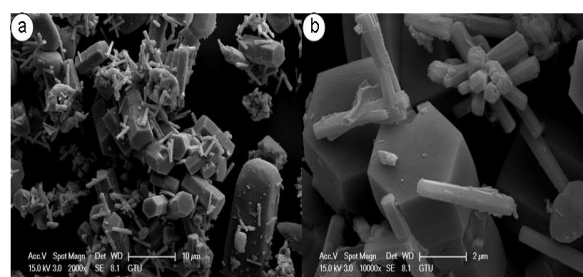
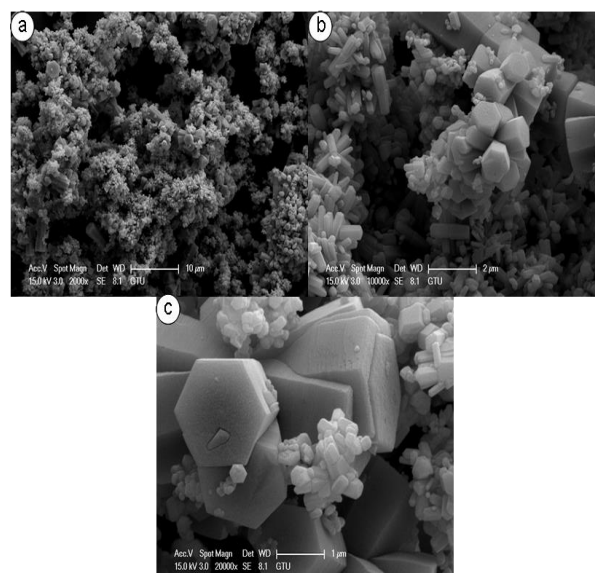
Rietveld refinement analysis for $Zn_{1-x}Tb_xO$ concentrations was provided, and for $x=0.02$ concentration rate, the refinement was plotted as seen in Fig. 1 (b). As seen in Fig. 1 (b) the refinement is highly compatible in terms of a very slight difference between observed and calculated patterns. All phases were matched well with the marked peak positions. We, therefore, conclude that the refinement with the Rietveld method proved the high-quality samples with the crystal structure. The microstructural parameters such as average nanorod sizes, volume of the unit cell, the concentration-dependent, lattice parameters, stress (σ), microstrain (ϵ), dislocation density (δ) (the amount of defect in the sample), bond length L , and the locality of the atoms and their displacement (u) were determined. The obtained microstructural parameter results from the Rietveld refinement method were reported in Table1 [1].

Table 1. The microstructural variations of formula-dependent $Zn_{1-x}Tb_xO$ nanorods.

	ZnO	Zn _{0.99} Tb _{0.01} O	Zn _{0.98} Tb _{0.02} O	Zn _{0.97} Tb _{0.03} O	Zn _{0.96} Tb _{0.04} O	Zn _{0.95} Tb _{0.05} O
a (Å)	3.251	3.245	3.247	3.249	3.243	3.247
c (Å)	5.208	5.2	5.199	5.202	5.2	5.202
c/a	1.601	1.602	1.601	1.601	1.603	1.602
Volume, V(Å ³)	47.667	47.418	47.473	47.559	47.360	47.499
D (nm)	48.125	49.032	52.297	53.146	54.059	45.442
$\epsilon \cdot 10^{-3}$	0.7202	0.7069	0.6628	0.6522	0.6412	0.7628
$\delta \cdot 10^{14}$	0.0004317	0.0004159	0.0003656	0.0003540	0.0003421	0.0004842
U	0.37988	0.37980	0.37998	0.37999	0.37964	0.37984
$\sigma \cdot 10^9$ (N/m ²)	-23.430	-64.868	-22.930	-22.954	-23.101	-23.418
L (nm)	1.9784	1.9750	1.9757	1.9769	1.9741	1.9761
E _g (eV)	3.199	3.194	3.251	3.209	3.199	3.224

The ϵ value was observed as the maximum for the dopant ratio of $x=0.05$ and except for $x=0.05$ a decrease in ϵ -values with increment Tb amount was revealed in the structure. The negative signed σ values in Table 1 show compressive stress. In the host lattice structure, the fluctuations in stress and strain values may give rise to much dislocations and physical defects. Therefore, the amount of defects in the sample referring to dislocation density (δ) was also studied. The highest particle size (54.059 nm) was provided for the concentration rate of $x=0.04$. An increasing tendency was observed in terms of particle sizes with increment of Tb amounts from $x=0.00$ to $x=0.04$ and after that concentration, the sizes of particles decreases. Almost no variation was observed in the u parameter ($u=0.379$) which is almost constant for all $Zn_{1-x}Tb_xO$ concentrations. We therefore conclude that the displacement is almost constant with the increment of Tb in the host lattice structure. Zn-O bond lengths L was calculated around 1.97 which is almost the same for all Tb-doped ZnO nanosystems. Now that the locality of atoms and their displacement was almost constant, this obtained result for L values is in the good harmony with u values.

Figures 2-7 belong to the SEM pictures of pure ZnO and $Zn_{1-x}Tb_xO$ nanorods. Almost perfect cross sections of hexagonal nanorods (consisting of micro-rods) were observed from provided SEM figures. The observed nanorods were divided into two groups depending on rod sizes without any continuous size distributions. The larger and smaller rods showed quite different in terms of sizes from each other as well. When we compared the groups of the specimens in SEM frame, at least 5 times larger in size was observed. Another effect giving rise to vary as size is the increasing Tb amount which is predominant reason in both increasing the number of smaller rods and decreasing the size of smaller rods.

**Fig. 2** the micrographical images for ZnO nanorods with varying magnifications.**Fig. 3** the micrographical images for Zn_{0.99}Tb_{0.01}O with varying magnifications.

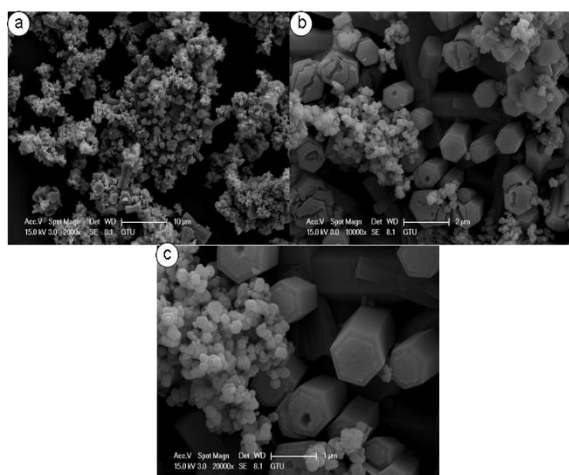


Fig. 4 the micrographical images for Zn_{0.98}Tb_{0.02}O with varying magnifications.

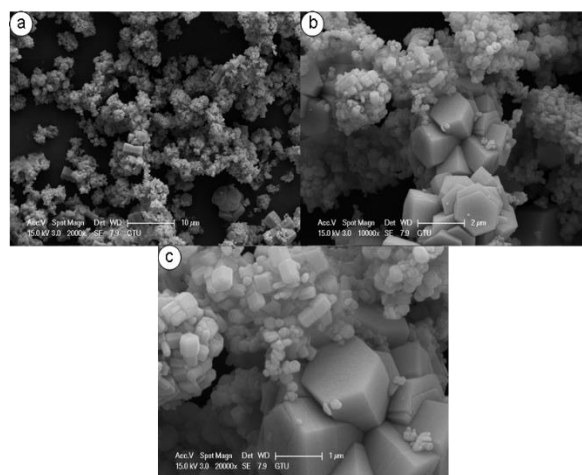


Fig. 7 the micrographical images for Zn_{0.95}Tb_{0.05}O with varying magnifications.

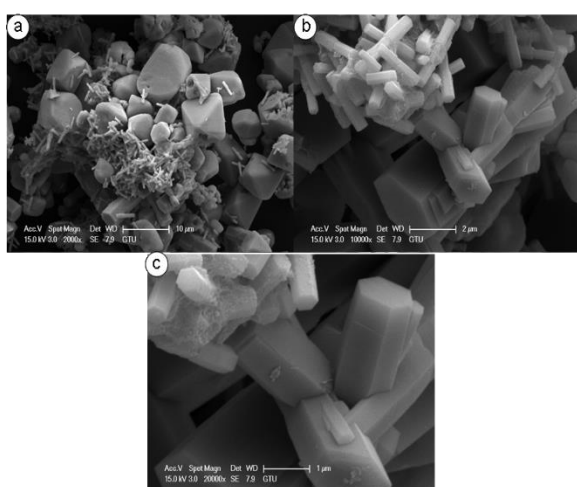


Fig. 5 the micrographical images for Zn_{0.97}Tb_{0.03}O with varying magnifications

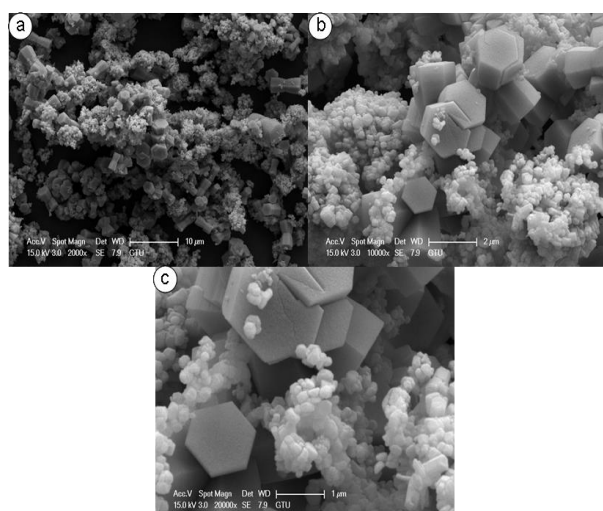


Fig. 6 the micrographical images for Zn_{0.96}Tb_{0.04}O with varying magnifications

3.2 FTIR analysis

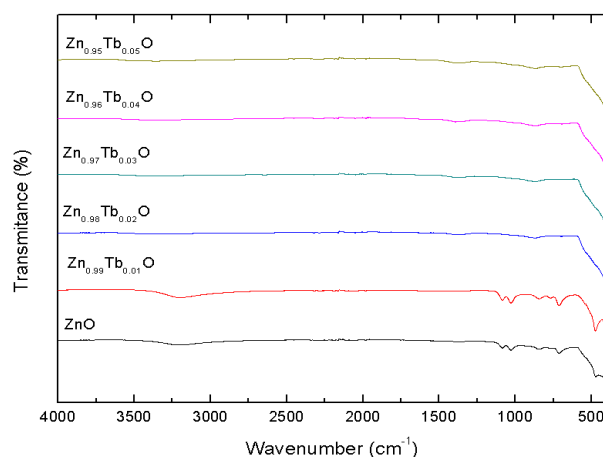


Fig. 8 FTIR spectra of Zn_{1-x}Tb_xO nanorods

Tb³⁺ doped ZnO and the pure ZnO stretching vibrations were depicted in Fig. 8. The observed C-O-C peaks in Fig. 8 are at 1087 and 1025 cm⁻¹ belonging to undoped and 1% Tb³⁺-doped ZnO samples respectively, and no other concentrations (x=0.02, 0.03, 0.04, and 0.05 Tb³⁺ ion-doped ZnO samples) had the same peaks too. Moreover, we conclude that the transformation of Zn(OH)₂ to ZnO was completed due to the ZnO peak that reveals between 585 and 475 cm⁻¹. The large band located at 475, 464, and 419 cm⁻¹ refers to the ZnO stretching in ZnO lattice in the literature [24- 28]. This stretching after x=0.01 concentration rate was disappeared in our case. In the doped samples, the doping effect of rare-earth ions should play a predominant role in the small shift in the peak positions. The band at 475 cm⁻¹ appears for undoped in Fig. 8. This behavior has also been reported for a study on Tb-doped ZnO [29]. These statements were proofed by the FTIR analysis wavenumber results demonstrated in Table 2. In undoped ZnO and Zn_{0.99}Tb_{0.01}O These (O-H, C-O-C, Zn-O) functional groups wave numbers not much have different.

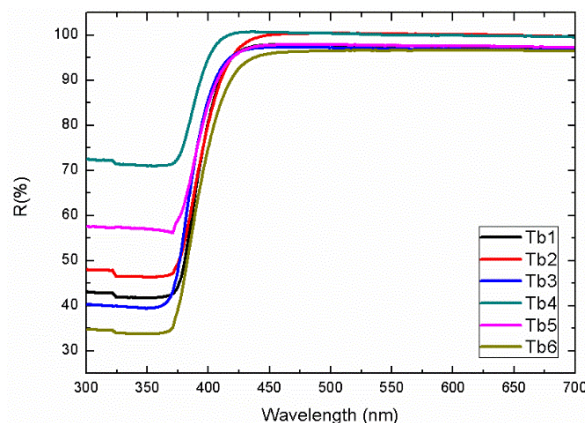
Table 2 FTIR spectra results of Tb-doped ZnO structures for varying concentrations.

Sample	Wavenumber (cm ⁻¹)	Functional group
undoped ZnO	3300	O-H
	1025, 1087	C-O-C
	475	Zn-O
Zn _{0.99} Tb _{0.01} O	3300	O-H
	1025, 1087	C-O-C
	475	Zn-O
Zn _{0.98} Tb _{0.02} O	585	Zn-O
Zn _{0.97} Tb _{0.03} O	585	Zn-O
Zn _{0.96} Tb _{0.04} O	585	Zn-O
Zn _{0.95} Tb _{0.05} O	585	Zn-O

3.3 Optical properties

3.3.1 UV-VIS diffuse reflectance spectra

In the range of 300–700 nm wavelengths, the reflectance spectra of all Zn_{1-x}Tb_xO powder concentrations gained by UV-VIS diffuse reflectance measurements (DRS) were presented in Fig. 9. Maximum reflectance was observed for Zn_{0.97}Tb_{0.03}O nanorods and moreover, we observed around 96 % reflectance intensities of all compositions. The position of the wavelength is observed randomly to shift with the increasing Tb-doped concentration in ZnO as shown in Fig. 9.

**Fig. 9** The reflectance spectra of the Zn_{1-x}Tb_xO powders synthesized by hydrothermal method.

3.3.2 Band Gap Calculation

The optical band gap E_g was calculated using the following equation between the photon energy ($h\nu$) and the absorption coefficient (α):

$$\alpha h\nu = k(h\nu - E_g)^{1/n} \quad (1)$$

In Eq. (1), k and E_g are the energy-independent constants and optical band gap, respectively. Since $F(R_\alpha)$ is proportional to α and ZnO has direct allowed transitions, n is taken as $1/2$. Thus, Eq. (1) can be transformed to:

$$F(R_\alpha) h\nu = k(h\nu - E_g)^{1/2} \quad (2)$$

Also, Eq. 2. could be written $(F(R_\alpha) h\nu)^2 = k^2(h\nu - E_g)$. The band gap energies E_g are calculated by the slope of the graph of $(F(R_\alpha) h\nu)^2$ to the photon energy axis where $F(R_\alpha) = 0$, ($E_g = h\nu$), as plotted in Figs. 10a-e. That is, the intersection between the linear fit and the photon energy axis gives the value of E_g . The calculated E_g values of Zn_{1-x}Tb_xO samples for the compositions ($x=0.0, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04$, and 0.05) were 3.2, 3.21, 3.24, 3.22 and 3.23 eV respectively. These changes in the values of the band gap energies of Tb-doped ZnO nanorods might be due to several factors such as crystallite size, carrier concentration, lattice strain, the size effect of the dopant metals in ZnO lattice.

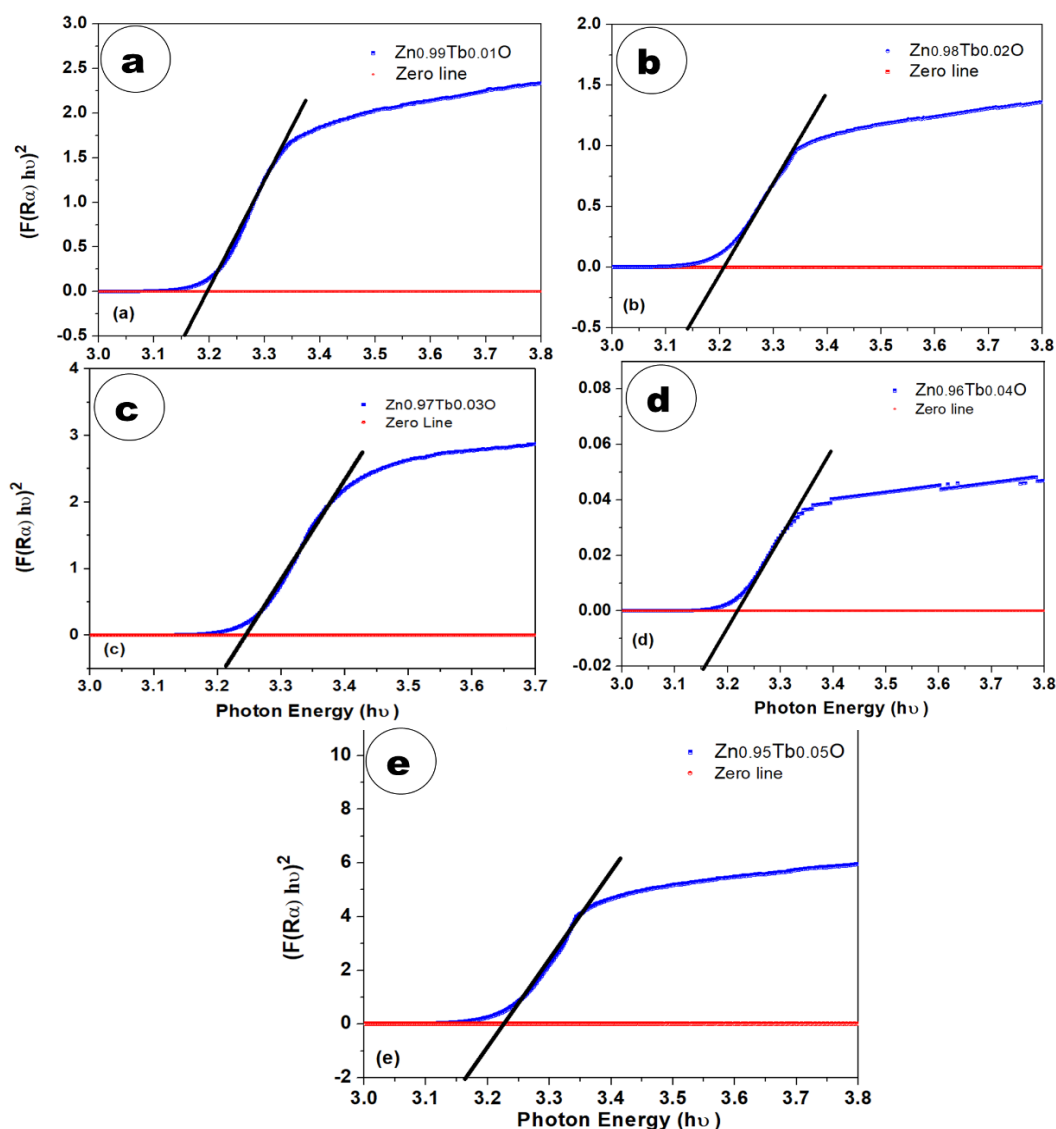


Fig. 10 The plots of $(F(R_{\alpha}) h\nu)^2$ as a function of photon energy ($h\nu$) and the linear fit for a) $x=0.01$, b) $x=0.02$, c) $x=0.03$, d) $x=0.04$, and e) $x=0.05$ concentration

IV. CONCLUSION

Terbium-doped ZnO was prepared by the hydrothermal method. Its structural, microstructural, and optical properties are analyzed based on their concentration dependence. X-ray diffraction and Rietveld refinement analysis exhibited a single phase of pure and Tb-doped ZnO nanorods. The SEM picture of all ZnO and $Zn_{1-x}Tb_xO$ nanorods showed that the nanorods consisted of the almost perfect hexagonal cross-section. The larger and smaller roads showed quite different in terms of sizes from each other as well. When compared to the groups of the specimens in the SEM frame, at least five times larger in size was observed due to the increasing amount of Tb in the structures. The reflectance spectra of $Zn_{1-x}Tb_xO$ ($x=0.00, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04$, and 0.05) nanorods showed that the maximum reflectance was observed for $Zn_{0.97}Tb_{0.03}O$ concentration and the reflectance

intensities of the samples were around 96 %. The band gap energies of Tb-doped ZnO nanorods were observed in the range of 3.2 - 3.24 eV. As a result the $Zn_{1-x}Tb_xO$ ($x=0.00, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04$, and 0.05) nanorods with the wide band gap ($E_g > 3$) could be a suitable material for optoelectronics and sensor applications. The lattice parameters also exhibited almost the same fluctuation behavior with band gap energies related to the concentration rates.

REFERENCES

- [1] Boyraz, C., Doğan, N. Arda, L. (2017). Microstructure and magnetic behavior of (Mg/Ni) co-doped ZnO nanoparticles. *Ceramics International*. 43, 15986-15991.
- [2] S. Kaya, D. Akcan, O. Ozturk, Arda, L. (2018). [Enhanced mechanical properties of yttrium doped ZnO nanoparticles as determined by instrumented](#)

- [indentation technique](#), *Ceramics International*. 44(9) 10306-10314.
- [3] Akcan, D. Gungor, A. [Arda, L.](#) (2018). [Structural and optical properties of Na-doped ZnO films](#). *Journal of Molecular Structure*. 1161 299-305.
- [4] Arda, L. Dogan, N. Boyraz, C. (2018). Effects of Annealing Temperature on Microstructure and Magnetic Properties of $\text{Ni}_{0.05}\text{Zn}_{0.95}\text{Fe}_2\text{O}_4$ Nanoparticles. *J. Supercond. Nov. Mag.* 31(2), 365-371.
- [5] Boyraz, C. Yesilbas, B. Arda, L. (2017). The temperature effect on structural and magnetic properties of $\text{Zn}_{0.95}\text{Fe}_{0.05}\text{O}$ nanoparticles. *Journ. of Supercon. Nov. Mag.* 30(6), 1691–1698.
- [6] Guler, A. Arda, L. Dogan, N. Boyraz, C. Ozugurlu, E. (2019). [The annealing effect on microstructure and ESR properties of \(Cu/Ni\) co-doped ZnO nanoparticles](#). *Ceramics International*. 45(2), 1737-1745.
- [7] Senol, S. D. Guler, A. Boyraz, C. Arda, L. (2019). [Preparation Structure and Magnetic Properties of Mn-Doped ZnO Nanoparticles Prepared by Hydrothermal Method](#). *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*. DOI: 10.1007/s10948-019-5030-7.
- [8] Senol, S. D. Boyraz, C. Ozugurlu, E. Gungor, A. Arda, L. (2019). [Band Gap Engineering of Mg Doped ZnO Nanorods Prepared by a Hydrothermal Method](#). *Crystal Research and Technology*. 54 (3), 1800233.
- [9] Rodnyi, P. A. and Khodyuk, I. V. (2011). Optical and Luminescence Properties of Zinc Oxide. *Optics and Spectroscopy*. 111, 776 - 785.
- [10] Hassan, A. Jin, Y. Irfan, M. Jiang, Y. (2018). Acceptor-modulated optical enhancements and band-gap narrowing in ZnO thin films. *AIP Advances*. 8, 035212.
- [11] Xiang, H. J. Yang, J. Hou, J. G. and Zhu, Q. (2006). Piezoelectricity in ZnO nanowires: A first-principles study. *Applied Physics Letters*. 89, 223111.
- [12] Nickel, N. H. and Terukov, E. (2005). Zinc Oxide—A Material For Micro- and Optoelectronic Applications. (Springer, Dordrecht).
- [13] Jeong, M. C. Oh, B. Y. Lee, W. and Myoung, J. M. (2005). Optoelectronic properties of three-dimensional ZnO hybrid structure. *Applied Physics Letters*. 86, 103105.
- [14] Lu, H. Zhou, P. Liu, H. Zhang, L. Yu, Y. Li, Y. and Wang, Z. (2016). Effects of nitrogen and oxygen partial pressure on the structural and optical properties of ZnO: N thin films prepared by magnetron sputtering. *Materials Letters*. 165, 123–126.
- [15] Ellmer, E. K. Klein, A. and Rech, B. (2008). Transparent Conductive Zinc Oxide, (Springer, Berlin).
- [16] Reynolds, D. C. Look, D. C. and Jogai, B. (2001). Fine Structure on the Green Band in ZnO. *J. Appl. Phys.* 89, 6189.
- [17] Chen, H. Gu, S. L. Tang, K. Zhu, S. M. Zhu, Z. B. Ye, J. D. Zhang, R. and Zheng, Y. D. (2011). Origins of green band emission in high-temperature annealed N-doped ZnO. *J. Lumin.* 131, 1189–1192.
- [18] Yun, I. (2012). Photodiodes: From Fundamentals to Applications (InTech).
- [19] Yim, K. Lee, J. Lee, D. Lee, M. Cho, E. Lee, H. S. Nahm, H. and Han, S. (2017). Property Database for Single-Element Doping in ZnO Obtained by Automated First-Principles Calculations. *Scientific Reports*. 7 40907.
- [20] Blasse, G. (1979). Handbook on the physics and chemistry of the rare earth, North-Holland, Amsterdam. 4.
- [21] Nazarov, M. I. Noh, D. Y. (2010). Rare earth double activated phosphors for different applications. *J. Rare Earths*. 28, 1-11.
- [22] Gogotsi, Y. (2006). Nanomaterials handbook. Routledge Publishers, USA.
- [23] Arda, L. (2019). The effects of Tb doped ZnO nanorod: An EPR study. *Jour. of Mag. and Mag. Mat.* 475, 493-501.
- [24] Maensiri, S. Laokul, P. Promarak, V. (2006). Synthesis and optical properties of nanocrystalline ZnO powders by a simple method using zinc acetate dihydrate and poly(vinyl pyrrolidone). *Journal of Crystal Growth*. 289 102-106.
- [25] Senthilkumaar, S. Rajendran, K. Banerjee, S. Chini, T. Sengodan, K. V. (2008). Influence of Mn doping on the microstructure and optical property of ZnO. *Materials Science in Semiconductor Processing*. 11, 6-12.
- [26] Anna, K. Nina, P. Yuri, K. Meinhard, M. Werner, Z. Aharon, G. (2008). Coating zinc oxide submicron crystals on poly (methyl methacrylate) chips and spheres via ultrasound irradiation. *Ultrasonics Sonochemistry*. 15 839–845.
- [27] Li, H. Wang, J. Liu, H. Yang, C. Xu, H. Li, X. Cui, H. (2004). Sol-Gel preparation of transparent zinc oxide films with highly preferential crystal orientation. *Vacuum*. 77 57–62.
- [28] Wahab, R. Ansari, S. G. Kim, Y. S. Seo, H. K. Shin, H. S. (2007). Room temperature synthesis of needle-shaped ZnO nanorods via sonochemical method. *Appl. Surf. Sci.* 253, 7622–7626.
- [29] Partha, P. Pal, J. M. (2013). Photoluminescence and thermoluminescence studies of Tb^{3+} doped ZnO nanorods. *Materials Science and Engineering B*. 178, 400–408.

Sintering of Seydişehir Alumina from Sol Gel Method with TiO₂ Addition

TiO₂ ile Sol Jel Kaplanmış Seydişehir Alüminanın Sinterlenmesi

Zeynep TAŞLIÇUKUR ÖZTÜRK¹ , Selin ENGÜRLÜ² , Nilgün KUŞKONMAZ³ 

¹ National Defence University, Turkish Naval Academy, Mechanical Engineering Department, 34942, Istanbul, Turkey

^{2,3} Yıldız Technical University, Faculty of Engineering, Metallurgy and Materials Engineering, Davutpasa Campus, Esenler, 34210, Istanbul, Turkey

Abstract

In this study, we report the sinterability of Seydişehir α -Al₂O₃ by coating TiO₂ colloidal particles by sol-gel method. In this context, efforts have been made to decrease the amount of impurities with washing process, to stabilize transformation with calcination and to reduce grain size by jet-mill grinding. It is aimed to increase the density of Al₂O₃ by coating TiO₂ by sol-gel method. The ceramic powders were dry-pressed, they were sintered at 1580°C for different hours (1h, 3h and 6h). The role of TiO₂ content and sintering time on the microstructural properties and density of final products were investigated.

Keywords: Al₂O₃, TiO₂, Sintering, Sol-Gel

Öz

Bu çalışmada, Seydişehir α -Al₂O₃, TiO₂ kolloidal parçacıklar ile sol-jel yöntemiyle kaplanmış ve α -Al₂O₃'nin sinterlenebilirlik özellikleri rapor edilmiştir. Yıkama işlemi ile kirlilik miktarını azaltmaya, kalsine ile dönüşümü stabilize etmeye ve jet değirmen öğütme ile α -Al₂O₃'nin tane boyutu azaltılmaya çalışılmıştır. TiO₂ sol-jel yöntemi kullanılarak kaplama ile Al₂O₃'ün yoğunluğunun artırılması amaçlanmıştır. Seramik tozları kuru preslenmiş, farklı saatler (1 saat, 3 saat ve 6 saat) boyunca 1580 °C'de sinterlenmiştir. TiO₂ içeriğinin ve sinterleme süresinin nihai ürünün mikroyapısal özellikleri ve yoğunluğu üzerindeki rolü araştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Al₂O₃, TiO₂, Sinterleme, Sol-Jel

I. INTRODUCTION

Alumina is a known ceramic material because of its high temperature stability, chemical inertness, strength, hardness, tribological, electrical and optical properties. The properties of alumina-based ceramics depend on the final microstructures which are affected by the characteristics of the starting powders[1-7].

Seydişehir Alumina has large particle size distribution and high impurity content. In recent years, many researchers focus on improving its sinterability properties by reducing the Na content, grinding and ceramic coating[2-4].

The ceramic coating improves the distribution of sintering aids, and also modify the rheological and consolidation behaviour of a ceramic suspension[5,8]. Sol-gel process is an useful method for the preparation of amorphous and structurally ordered materials and allows the synthesis of powders with a more controlled structure and morphology. It also improves the reactivity of the synthesized material such as porosity and surface area, to obtain homogeneous matrices[9-11]. Sol-gel method is highly preferred due to its low process cost, easy control of composition and relatively low calcination temperature[8,12,13]. The solid-state method requires a sintering process at high temperatures with a long holding time. This process may lead to sodium loss and exaggerated grain growth, which are deleterious to the mechanical strength. In order to decrease the sintering temperature, sol-gel method has been studied. The mixed oxides of TiO₂ and Al₂O₃ is a good alternative to overcome the problems of

the single phases like stabilization of porosity structure would be obtained at high temperatures. [14-18]. In recent years, synthesized TiO₂ powders with control over the crystalline phase, crystallite size, morphology and surface area have been used in various synthesized methods, such as sol-gel, hydrolysis, hydrothermal process, etc [19]. TiO₂-Al₂O₃ composite materials that have several interesting physical properties protected metallic structural components against wear and corrosion due to their thermal, chemical and mechanical stability. TiO₂-Al₂O₃ structures are used in various applications including catalysis, solar cells, photocatalytic, and self-cleaning [8,20].

A comparative study on density and morphological properties of Seydişehir Al₂O₃ sol gel coated by TiO₂ is presented. The present approach results in good densification without significant grain growth.

II. MATERIALS AND METHODS

The raw material, Seydişehir α-Al₂O₃ powder (Al₂O₃(%98,5), SiO₂(%0,030), Fe₂O₃(%0,035), Na₂O(0,5) was jet milled for 30 min. Jet mill grinding is a mechanical method used for superfine grinding. The most important advantage is that it reduces grain size to 1-10 μm in a narrow distribution range. The Seydişehir alumina was fed to the dosing unit by means of air jets (8 units) with 7 bars of pressure produced in the screw compressor and milled at high speed. The samples were washed to reduce the Na₂O content at 35°C and 70°C for 1 hour by heated magnetic stirrer. 450 ml distilled water ve 50 ml HCl acid were used as washing fluid. After washing, the cake filtered under vacuum was washed with pure water. The material was dried at 80 °C. % Na ratios of Seydişehir Al₂O₃ before and after washing was given in Table 1.

Table 1. % Na ratios of Seydişehir Al₂O₃ before and after washing

Al ₂ O ₃ Samples	% Na
Alcoa Al ₂ O ₃	0,174
Seydişehir Al ₂ O ₃ before washing	0,442
Seydişehir Al ₂ O ₃ after washing	0,121

Seydişehir alumina was calcined at 1200°C for 2 hours to obtain % 100 corundum (α-Al₂O₃) in Linn High Therm furnace. After calcination, 9,6 gr Al₂O₃ was subjected to coating with 0,4 gr TiO₂ colloidal particles by sol-gel method. 1,42 gr TIP (titanium (IV) isopropoxide), 2,84 gr 2-propanol, 250 ml distilled water and 2,5 ml HNO₃ were used as the starting material in the sol-gel method. During sol-gel reaction, water reacts with titanium isopropoxide molecules to form nano-sized TiO₂ particles as shown below in Equation(1).



This mixture is stirred for 24 hours in a magnetic stirrer. The powder is then precipitated in Nuve NF-400 Centrifuge. The precipitated mixture of Al₂O₃ and TiO₂ was dried at 80 °C. The forming process was performed by pressing 2 g samples of Alcoa Al₂O₃, Seydişehir Al₂O₃ and TiO₂ added Seydişehir Al₂O₃ under a weight of 1600 kg. They were sintered at 1580°C for 1h, 3h and 6h, respectively. The microstructures of the samples were characterized by SEM (JEOL JAMP 9500F Field Emission Auger Microprobe). Particle size distributions of Seydişehir alumina and milled Seydişehir aluminas were carried out in Shimadzu SA-CP2 brand sedimentation and centrifugal grain size measuring device and Laser-ray detection principle Malvern-Mastersizer 2000S device. The density of sintered bodies was determined by Precise 205ASCS device with Archimedes principle.

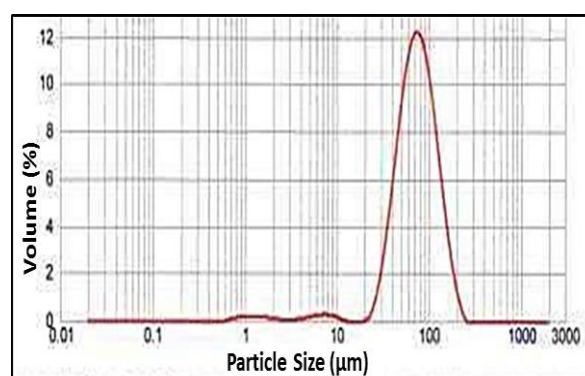
III. RESULTS AND DISCUSSION

The chemical analysis of Seydişehir alumina is given in Table 1. Bulk density and absolute density of Seydişehir alumina are 1.00-1.10 gr/cm³ and 3.30-3.60 gr/cm³, respectively.

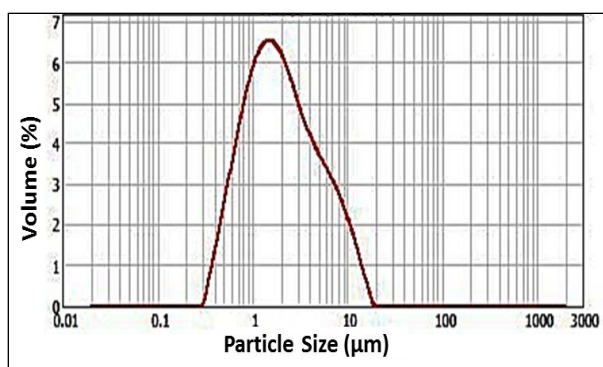
Table 2. Chemical analysis of Seydişehir alumina powder

Chemical analysis	LOI (1100°C)	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O
(%) max	1	98.5	0.030	0.035	0.50

Grain refining process was applied to high grain sized alumina by jetmill grinding. The average grain size of the powder was 82.088 μm before jet-milling. After 30 min jet-milling, average grain size of the powder was 4.618 μm as given in the **previous study as shown in Figure 1** [4].



(a)



(b)

Figure 1. Particle size distribution of Seydişehir alumina a) before jet milling b) after jet milling[4]

According to XRD analysis in Figure 2, it was seen that Seydişehir alumina did not consist of completely α -Al₂O₃ before calcination. After calcination at 1200 °C for 2 h, the transition phases transformed to α -Al₂O₃. Technical alumina ceramics could reach to the desired quality by calcination and grinding under controlled conditions[4]. % 100 corundum (α -Al₂O₃) was obtained after 2 hours calcination.

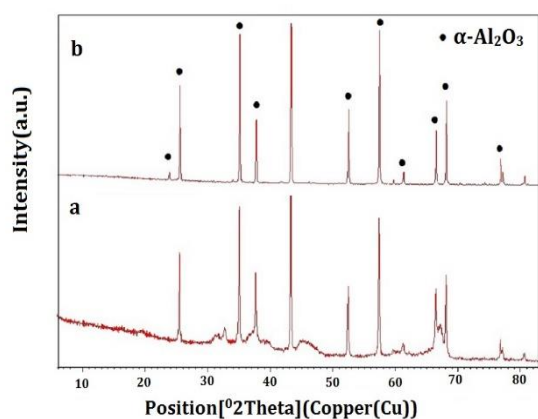
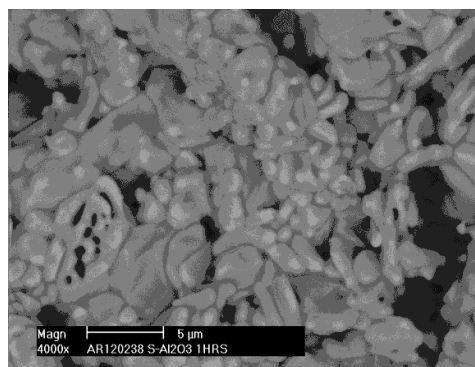
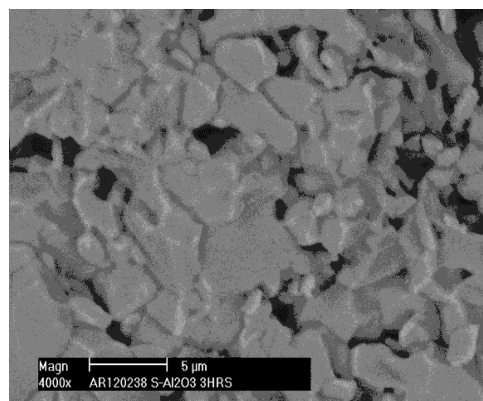


Figure 2. XRD patterns of the specimen a) before calcination b) after calcination at 1200°C for 2 h[4].

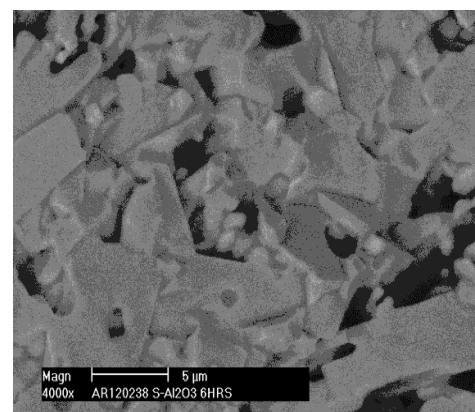
Calcined and milled alumina was sintered at 1580 °C for varying periods (1h, 3h and 6h). Figure 3 shows the SEM photographs of the sintered samples. Despite the increase of sintering time, porosity was still observed in the samples. Also, grain growth occurred during sintering. The effect of reaction time plays a great role in the morphology of the particles. Grain growth is considered to be undesirable due to adverse effects that such growth may have on mechanical properties[21].



(a)



(b)



(c)

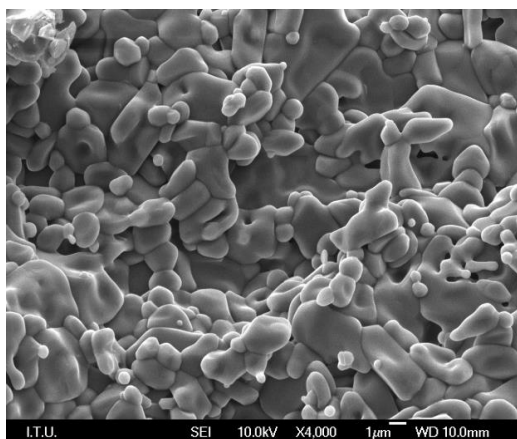
Figure 3. SEM photograph of the samples sintered at 1580°C for varying periods a)1 hour b) 3 hour c) 6 hour

Table 2 shows the density of the samples sintered at 1580 °C for 1, 3, 6 hour and density of the coated samples with TiO₂ colloidal particles by sol-gel method sintered at 1580°C for 1, 3, 6 hour.

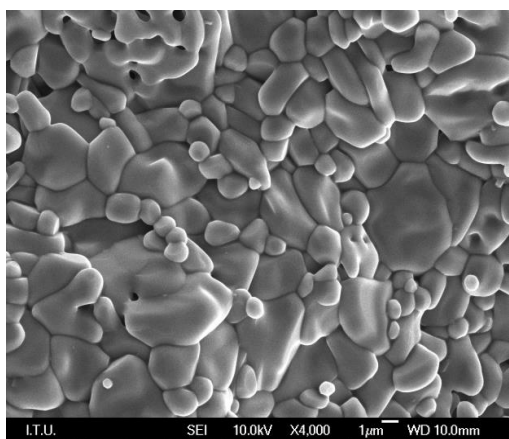
Table 3. Density of the samples sintered at 1580 °C and coated samples with TiO₂

Time(h)	Density of the samples sintered at 1580 C(g/cm ³)	Density of the coated samples with TiO ₂ sintered at 1580 C(g/cm ³)
1	3,539	3,879
3	3,544	3,880
6	3,548	3,900

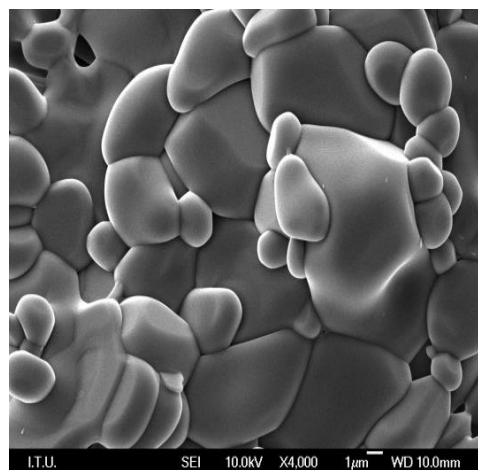
Density of the coated samples with TiO₂ increased and this result was supported by SEM images in Figure 2. TiO₂ coated alumina is effective in enhancing grain growth when compared with an uncoated material. No microcracks are observed in any of the samples. TiO₂ grains are uniformly dispersed in the Al₂O₃ matrix. The increase of sintering time caused an increase in grain size of the samples as can be seen from the coarser grains in the microstructures(Figure 4). The grain size of the samples sintered for 6 hours was found as 10 microns.



(a)



(b)



(c)

Figure 4. SEM photograph of the TiO₂ coated samples sintered at 1580 °C for varying periods a) 1 hour b) 3 hour c) 6 hour

IV. CONCLUSION

In this study, it is aimed to increase the sintering ability of Seydişehir alumina powder. Therefore, alumina powder was washed to decrease the amount of impurities, calcined to stabilize the transformation and jet-milled to reduce the grain size. Al₂O₃ is coated with TiO₂ by sol gel method. The density and the grain size of sintered samples increase with increasing sintering time. TiO₂ plays an important role in the densification of the resulting samples. Tests made on TiO₂ doped alumina have been observed to increase in density. As a result of the study, density of the coated samples with TiO₂ was reached a max value as 3,9 g/cm³. However, no difference was observed between 3 hours and 6 hours. Therefore, it can be said that sintering time did not cause an increase in density. In order to increase the density more, it is necessary to reach higher temperatures.

ACKNOWLEDGMENT

This work is financially supported by Project number 2011-07-02-YÜLAP06. The authors wish to acknowledge the Scientific Research Project Coordination of Yildiz Technical University.

REFERENCES

- [1] Yong, Y., You, W., Zheng, W., Gang L. and Wei, T. (2008). Preparation and sintering behaviour of nanostructured alumina/titania composite powders modified with nano-dopants. *Mater. Sci. Eng. A.*, 490, 457-464.
- [2] Erten, R., Emrullahoğlu, C.B., Yazıcı, Z.O. and Emrullahoğlu, Ö.F. (2004). An investigation on injection moulding of Seydişehir alumina. *Key Eng. Mater.*, Vols. 264-268, 2523-2526.
- [3] Palacı, Y.(2001). *Alüminanın özelliklerine, şekillendirme yönteminin, katkılarının ve sinterleme sıcaklığının etkisi. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Türkiye, p. 8-10.*

- [4] Engürlü, S., Taşlıçukur Öztürk, Z. and Kuşkonmaz, N. (2017). Investigation of the production of β -Al₂O₃ solid electrolyte from Seydişehir α -Al₂O₃. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, Cilt 21 (3), 816-819.
- [5] Jayasankar, M., Ananthakumar, S., Mukundan, P., Wunderlich, W. and Warriar, K.G.K. (2008). Al₂O₃ @ TiO₂-A simple sol-gel strategy to the synthesis of low temperature sintered alumina-aluminium titanate composites through a core-shell approach. *J. Sol. St. Chem.*, 181, 2748-2754.
- [6] Avcı, G.G., Mısırlı, Z. and Günay, V. (1996). Processing and characterization of microfiltration supports prepared from alumina powders. *Cer. Inter.*, 22, 23-26.
- [7] Ahmed, M.A., Abdel-Messih, M.F. (2011). Structural and nano-composite features of TiO₂-Al₂O₃ powders prepared by sol-gel method. *J. Alloys Comp.*, 509, 2154-2159.
- [8] Arıer, U.Ö.A. and Tepehan, F.Z. (2013). Influence of Al₂O₃:TiO₂ ratio on the structural and optical properties of TiO₂-Al₂O₃ nano-composite films produced by sol gel method. *Comp.: Part B.*, 58, 147-151.
- [9] Toygun, Ş., Köneçoğlu, G. and Kalpaklı, Y. (2013). General principles of sol - gel. *J. Eng. Nat. Sci. Sig.*, 31, 456-476.
- [10] Dascalescu, T., Todan, L., Rusu, A., Preda, S., Andronescu, C., Culita, D.C., Munteanu, C. and Zaharescu, M. (2014). Nanosized Al₂O₃-TiO₂ oxide powder with enhanced porosity obtained by sol-gel method. *Rev. Roum. Chim.*, 59 (2), 125-134.
- [11] Farias, R.F., Arnold, U., Martínez, L., Schuchardt, U., Jannini, M.J.D.M. and Airoidi, C. (2003). Synthesis, characterization and catalytic properties of sol-gel derived mixed oxides. *J. Phys. Chem. Sol.*, 64, 2385-2389.
- [12] Jung, Y., Kim, D., Kim, Y., Park, E. and Baek, S. (2008). Synthesis of alumina-titania solid solution by sol-gel method. *J. Phy. Chem. Sol.*, 69, 1464-1467.
- [13] Leblebicier, Y., Yüzer, H. and Emrulloğlu, Ö.F. (2000). Sol Jel metodu ile mikronaltı incelikte alümina üretimi. *Afyon Kocatepe University J. Sci.*, 2 (1), 1-12.
- [14] Shi-Jie, S., Li-Ping, Y., Xiao-Min, L., Xiao-Ling, W., Hui, Y. and Xiao-Dong, S. (2013). Preparation and characterization of TiO₂ doped and MgO stabilized Na- β '-Al₂O₃ electrolyte via a citrate sol-gel method. *J. All. Comp.*, 563, 176-179.
- [15] Yang, L.P., Shan, S., Wei, X., Liu, X., Yang, H. and Shen, X. (2014). The mechanical and electrical properties of ZrO₂-TiO₂-Na- β / β '-alumina composite electrolyte synthesized via a citrate sol-gel method. *Cer. Inter.*, 40 9055-9060.
- [16] Habibpanah, A.A., Pourhashem, S. and Sarpoolaky, H. (2011). Preparation and characterization of photocatalytic titania-alumina composite membranes by sol-gel methods. *J. Eur. Cer. Soc.*, 31, 2867-2875.
- [17] Akbarnezhad, Sh., Mousavi, S.M. and Sarhaddi, R. (2010). Sol-gel synthesis of alumina-titania ceramic membrane: Preparation and characterization. *Ind. J. Sci. Tech.*, Vol. 3 No. 10 ISSN: 0974- 6846, 1048-1051.
- [18] Mohammadi, M.R. (2014). Semiconductor TiO₂-Al₂O₃ thin film gas sensors derived from aqueous particulate sol-gel process. *Mater. Sci. Semi. Proc.*, 27, 711-718.
- [19] Cheng-Li, W., Weng-Sing, H., Hsueh-Liang, C., Huey-Jiuan, L., Horng-Huey, K. (2016). Kinetics of anatase transition to rutile TiO₂ from titanium dioxide precursor powders synthesized by a sol-gel process. *Cer. Inter.*, 42, 13136-13143.
- [20] Vanessa, D., Homero, M., Mariana, F., Anderson, L., Rodrigo, P., Fernanda, M. (2019). Atomic layer deposited TiO₂ and Al₂O₃ thin films as coatings for aluminum food packaging application. *Mater.*, 12, 682.
- [21] Dorian, A.H.H., Wanqiang, X., Michael, F. and Charles, C.S. (2012). Abnormal grain growth of rutile TiO₂ induced by ZrSiO₄. *J. Cry. Grow.*, Volume 359 83-91.

Demir Bazlı Nano-Sıvının Tek-Faz ve Havuz Kaynama Isı Transferi Şartlarında Ekserji Analizi

Exergy Analysis of Ferrofluid Nanofluid under Single-Phase and Pool Boiling Conditions

Mehmed Rafet ÖZDEMİR¹ 

¹Marmara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 34722, İstanbul, Türkiye

Öz

Son yıllarda termal-sıvı uygulamaları artan ısı akısını karşılamak için en sık kullanılan yöntemlerden biri olmaya başlamıştır. Bu uygulamalardan en popüler olanlarından biri sıvıya nano-parçacık karıştırarak ısı transfer hızını arttırmaya çalışmaktır. Teoride kabul gören bu yöntem için farklı araştırma gruplarından farklı sonuçlar gelmekle birlikte kesin bir yargıya henüz tam olarak ulaşıldığı söylenemez. Sıvıya nano-parçacık eklemenin en zorlu yanı, birçok çalışmada belirtildiği gibi nano-parçacıkların yüzey üzerinde kümelenmeye ve çökelmeye meyilli olması ve bu durumun olması halinde ısı transferine negatif etki yapmasıdır. Bu özelliklerinden ötürü nano-parçacıkların sistem üzerinde kararsız davranış oluşturduğu da bazı çalışmalarda rapor edilmiştir. Bu çalışmada ana sıvı olarak suya Fe₃O₄ nano-parçacıkları eklenen sistemin ekserji analizi yapılmıştır. Burada en önemli nokta, sistemin manyetik kuvvete maruz bırakılması olup bu sayede çökelme ve kümelenmeye fırsat verilmeyecek olmasıdır. Bu çalışmada literatürden farklı olarak sistemin tek-fazlı akış ve havuz kaynama şartlarındaki verimi ekserjetik verim üzerinden değerlendirilecektir. Sonuçlar saf su, su-Fe₃O₄ nano-sıvısı ve manyetik kuvvet altındaki su-Fe₃O₄ nano-sıvısı şeklinde sunulup ekserji yıkım oranları karşılaştırılmıştır.

Anahtar kelimeler: nano-sıvı, ekserji analizi, havuz kaynama, tek-fazlı ısı transferi

Abstract

In recent years, thermal-liquid applications have become one of the most commonly used methods to meet high heat flux demand. One of the most popular of these applications is to try to enhance the heat transfer rate by mixing nanoparticles into the liquid. Although different results come from different research groups for this method, which is accepted in theory, it cannot be said that a satisfactory conclusion has been reached yet. The most challenging aspect of adding nanoparticles to the liquid is that, as noted in many studies, the nanoparticles tend to cluster and sediment on the surface and, if this happens, have a negative effect on heat transfer. Due to these characteristics, some studies have reported that nanoparticles cause unstable behaviour on the system. In this study, exergy analysis of Fe₃O₄-water nanofluid has been performed. The most important point here is that the system is exposed to magnetic force, so that clustering and sedimentation is prevented. In this study, unlike the literature, the efficiency of the system will be evaluated on the basis of exergetic efficiency. The results will be presented for pure water, Fe₃O₄-water nanofluid and Fe₃O₄-water under magnetic actuation and their exergy destruction rate values will be compared and discussed.

Keywords: nanofluids, exergy analysis, pool boiling, single-phase heat transfer

1. GİRİŞ

Endüstri 4.0' a geçiş, yüksek enerji ile çalışan akıllı sistemler, yüksek güç tüketen hızlı sunucular ve daha birçok gelişme son yıllarda şahit olduğumuz teknolojik gelişmelerdir. Bu gelişmelerle birlikte başta elektronik cihazlar daha da küçülmüş ve hızlanmış fakat yaydıkları ısı akısı da çok yüksek seviyelere ulaşmıştır [1-3]. Bu sistemlerin kendi boyutlarındaki mikro ısı değiştiriciler kullanılarak soğutulması da bilim adamları için önemli araştırma konusu olmuştur [4-6]. Bu noktada, son yıllarda sıvı ile soğutma popüler olmakla beraber daha yakın zamanda ana sıvıya nano-parçacık karıştırarak ısı transferini daha fazla arttırmaya çalışmak birçok çalışmanın konusu olmuştur [7-11]. Bunun en önemli sebebi nano-sıvıların ana sıvılarına göre daha yüksek ısı iletkenliklerinin olmasıdır [12, 13]. Öte yandan birçok çalışmada gösterildiği üzere yüzey yapısı tek-fazlı ve kaynama ısı transferine önemli ölçüde pozitif olarak etki etmektedir [14-17]. Bu noktadan yola çıkarak, baz sıvıya katılan nano-parçacıkların tek-fazlı ısı transferinde yüzey alanını arttırarak kaynama ısı transferinde ise ekstra aktif çekirdeklenme konumları oluşturarak ısı transferine katkı verdikleri söylenebilir. Bu bilgilerle ek olarak, birkaç çalışmada nano-parçacıkların rastgele

hareketlerinin ve termoforez etkisinin sistemin genel enerji taşınımını arttırdığı belirtilmiştir [11, 18]. Nano-sıvıların ısı transferi performansını etkileyen ve en çok karşılaşılan en önemli parametreler kümelenme ve çökeltmedir. Bu durumlar oluştuğunda sistemin genel stabilitesini de etkileyerek ısı transferine negatif etki yapmaktadır [19, 20].

Literatürde kümelenme ve çökeltme sorunlarını aşmak için manyetik kuvvetle hareketlendirilen nano-sıvılar kullanılmıştır [20-24]. Şeşen vd. [20] manyetik olarak hareketlendirilen su-Fe₃O₄ nano-sıvısının tek-faz ve havuz kaynama şartları altında ısı transferi özelliklerini inceledi. Araştırmacılar, manyetik olarak hareketlendirilen nano-sıvının tek-fazlı durumda % 29, havuz kaynama şartları altında % 17 daha yüksek ısı transferi katsayısına sahip olduğunu bildirdi. Kurtoğlu vd. [21] manyetik olarak hareketlendirilen nano-parçacıkların mikro pompa üzerinde sıvı kontamine oluşturmadığını gösterdi. Başka bir çalışmada ise, Özdemir vd. [23] çift katmanlı yağ asidi kaplanmış manyetik olarak hareketlendirilen demir bazlı nano-sıvıların havuz kaynama ısı transferini inceledi. Sonuçlara göre manyetik kuvvet ile hareketlendirilen nano-sıvıların ısı transferi performansı manyetik kuvvet olmayan duruma göre % 42 daha yüksek bulundu. Ayrıca, aynı demir kütlelerinde manyetik kuvvetin olduğu durumda çökeltme ve kümelenme olayları manyetik kuvvetin olmadığı duruma göre çok daha geç oluştuğu bildirilmiştir. Başka bir çalışmada ise Şeşen vd. [24] ferro-manyetik nano-parçacıkların deneysel olarak tek-fazlı ısı transferini özelliklerini inceledi. Çalışmanın sonunda ortalama ısı transferi katsayısının manyetik kuvvet altında % 37.5 iyileşme gösterdiği ve sadece ekstradan 5 W pompa gücü ile bunun sağlandığını bildirdiler.

Yukarıdaki çalışmalarda bahsedilen verim terimi ısı transferi hesapları ile sınırlandırılmış olup ekserji analizi göz önünde bulundurulmamıştır. Öte yandan, termodinamik bir yaklaşım araştırması devam etmekte olan manyetik olarak hareket ettirilen demir bazlı nano-sıvıların performanslarını değerlendirmek için önemli bir faktör olabilir. Birçok çalışmada bildirildiği gibi, ekserji, sistemin faydalı enerji miktarı olan iş potansiyelidir. Bu nedenle, ekserji, sistemlerin performansını değerlendirmek için klasik enerji parametrelerinden daha güçlü bir araç olarak düşünülebilir [25, 26]. Dahası, ekserji analizi bir sürecin sürdürülebilirliği için gerekli olan etkili bir işlem veya kurulumun nasıl seçileceği konusunda güçlü fikirler verebilir [27, 28]. Literatürde nano-sıvıların ekserji analizini içeren çalışmalara rastlanmıştır [29-33]. Khaleduzzaman vd. [29] distile su – Al₂O₃ nano-sıvısının dikdörtgen mikrokanaallarda ekserji verimini araştırmıştır. Ekserji veriminin nano-parçacık hacimsel oranıyla beraber artarken Reynold sayısı ile azaldığını gösterdiler. Başka bir çalışmada ise Esfahani ve Languri [30] su-grafen oksit nano-sıvısı kullanan kabuk-boru tipi ısı

eşanjörünün ekserji analizini gerçekleştirmiştir. Deneyler sırasında baz sıvı olan suyun içerisine grafen oksit miktarı ağırlıkça % 0.01 - % 0.1 aralığında değiştirilmiştir. Sonuçlar, sıcak sıvı olarak distile su-grafen oksit nano-sıvısının kullanılmasının, hem laminar hem de türbülanslı koşullar altında kabuk-borulu ısı eşanjöründe daha az ekserji kaybına yol açtığını göstermiştir. Öte yandan, sıcak sıvı olarak sadece distile su kullanıldığında laminar şartlarda % 22 ve türbülanslı şartlarda % 109 daha yüksek ekserji kaybı yaşandığı gösterilmiştir. Başka bir çalışmada ise Said vd. [31] farklı partikül büyüklüğünde (13 nm ve 20 nm) sabit hacimsel orandaki (% 0.1) Alüminyum nano-parçacıkları içeren su – Al₂O₃ nano sıvısını solar kollektörleri soğutmak için kullanmışlardır. Sistemin genel enerji ve ekserji analizini yapmışlardır. Nano-sıvı kararlı duruma geçtikten sonra deneylere başlanmış olup 13 nm büyüklüğündeki Al₂O₃ sıvısının diğer numune kıyasla daha yüksek ısı iletkenlik katsayısına sahip olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca deneyler sonucunda 13 nm büyüklüğündeki Al₂O₃ – su nano-sıvısının diğer nano-sıvıya göre daha yüksek enerji ve ekserji verimliliğine sahip olduğu gösterilmiştir. Bu bulgulara ek olarak, yazarlar termoeconomik analiz de yapmış olup, nano-sıvılı sistemin geleneksel sistemlere göre daha kısa geri ödeme süresine sahip olduğunu ve daha az çevresel yan etkilerinin olduğunu belirtmişlerdir. Çok yakın zamandaki bir çalışmada Mukherjee vd. [32] su bazlı Al₂O₃, TiO₂, CuO ve SiC nano-sıvıların enerji, ekserji kaybı ve pompa gücü analizlerini dikdörtgen mikrokanaallı ısı değiştiricilerde sabit ısı akısı şartları altında incelediler. Nano-parçacıkların ağırlık yüzdeleri % 0 – % 5 aralıklarında değiştirildi. Nano-parçacıkların ağırlık yüzdeleri ana sıvı içerisinde arttıkça oluşan nano-sıvının termal iletkenlik katsayısının da arttığı belirtildi. Fakat öte yandan, nano-parçacık ağırlık yüzdesi artışı sistemin pompa için harcaması gereken güç miktarını ve ekserji kaybını arttırdığı gözlemlendi. Termal enerji verimliliği CuO – su nano-sıvısının %5 ağırlık yüzdesinde maksimum olarak rapor edildi. Sonuç olarak, araştırmacılar CuO – su nano sıvısını Al₂O₃ – su, TiO₂ – su ve SiC – su nano-sıvılarına göre daha önerilebilir olduğu kanısına vardı.

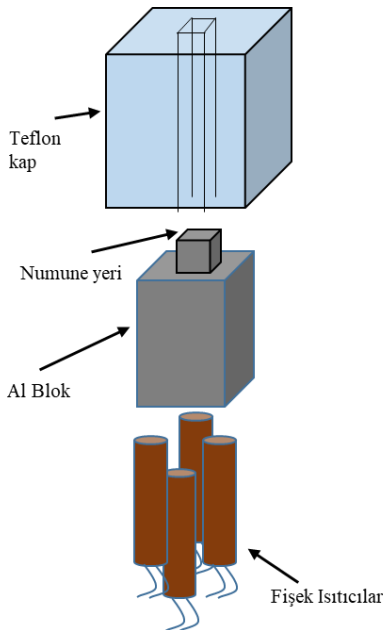
Yukarıdaki literatür taramasından görüldüğü üzere bazı çalışmalarda nano-sıvıların soğutma sistemlerinde kullanımı ısı transferi performansını ve termal enerji verimliliğini arttırmıştır. Diğer taraftan, bazı çalışmalarda ise nano-sıvıların çökeltme, kümelenme ve kararsız davranışlarından dolayı ısı transferi performansına etki etmediği ya da negatif yönde etki ettiği belirtilmiştir. Bununla birlikte manyetik kuvvete maruz kalan manyetik bazlı nano-sıvılar için yapılan termal-hidrolik performans analizini içeren çalışmalar oldukça nadirdir. Bu çalışmalarda manyetik kuvvetin nano-sıvılarda görülen çökeltme, kümelenme ve kararsız davranışlara nano-parçacıkların rastgele hareketlerinin ve termoforez etkisi sayesinde çözüm getirdiği söylenmiştir. Öte yandan bu nadir

çalışmalarda da verim analizleri birinci yasa üzerinden incelenmiş olup ekserji analizi hesaba katılmamıştır. Bu çalışmada, manyetik kuvvete maruz bırakılan Fe_3O_4 nano-parçacıklarından oluşan Fe_3O_4 – su nano-sıvısının ekserji verim analizi tek-fazlı durum ve havuz kaynama şartları altında gerçekleştirilecektir. Ekserji yıkımı oranı değerleri nano-parçacık karıştırılmayan saf su sonuçları ve manyetik kuvvete maruz bırakılmayan Fe_3O_4 – su nano-sıvısının sonuçları ile karşılaştırılacaktır.

II. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde fiziksel model ve test düzeneğinden bahsedilecektir. Ayrıca, sistemin ekserji analizi için gerekli matematiksel denklemler ve alınan sıcaklık ve manyetik kuvvet verilerinin işlenişi için kullanılan veri indirgeme denklemleri verilecektir. Test düzeneğini oluşturmak için alüminyumdan yapılmış blok içine dört adet fişek ısıtıcı yerleştirilmiştir. Bu blok teflondan yapılmış içi boş bir kutuya yerleştirilmiştir. Bunun amacı sistemde sadece yukarıdan aşağıya ısı transferi (1-boyutlu ısı transferi) sağlamak yani diğer taraflardan kaybı minimize etmektir, bakınız Şekil 1. Sisteme verilen ısı, fişek ısıtıcıların DC güç ünitesine bağlanmasıyla sağlanmıştır ve **Eşitlik (1)** yardımıyla hesaplanabilir.

$$P = V \times I$$



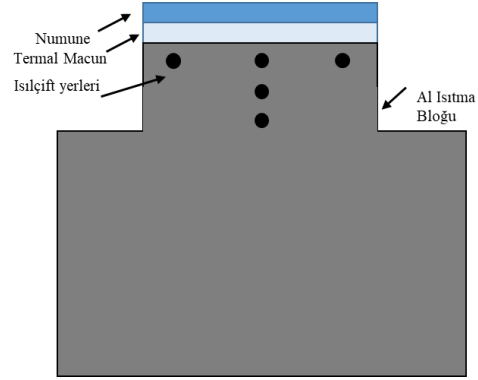
Şekil 1. Deneysel düzeneğin şematik gösterimi

Burada V voltaj girişi ve I sistemin çektiği toplam akımdır. Öte yandan, Alüminyum blok üstüne termal macun yardımıyla silikondan yapılmış test numunesi yerleştirilmiştir. Test numunesinden sıcaklık verileri alüminyum blok içine yerleştirilen K tipi ısılıçiftler yardımıyla ölçülen duvar-sıcaklık verileri sayesinde alınmıştır, bakınız Şekil 2. Böylece 1-boyutlu ısı transferi prensibinden numunenin yüzeyindeki sıcaklık

Eşitlik (2) vasıtasıyla hesaplanır. Öte yandan, sistemde sabit ısı akışı olması hedeflenmiş olup **Eşitlik (3)** yardımıyla hesaplanabilir.

$$T_s = T_w - qR_{tot} \quad (2)$$

$$q'' = \frac{(P - Q_{loss})}{A_{ht}} \quad (3)$$



Şekil 2. Test ve veri düzeneğinin şematik gösterimi

Eşitlik (2)'deki T_w alüminyum blok içinde ölçülen duvar sıcaklığı olup R_{tot} ise toplam ısı direncidir. Toplam ısı direnci, alüminyum blok ve termal macunun kalınlıkları bilgisiyle geleneksel kondüksiyon ısı transferi hesaplamalarıyla bulunur. **Eşitlik (3)**'teki, Q_{loss} ölçülen ısı kaybı ve A_{ht} numunenin ısı transfer alanıdır. Böylece tek-fazlı ve havuz kaynama ısı transfer katsayıları sırasıyla **Eşitlik (4)** ve **Eşitlik (5)** yardımıyla hesaplanabilir.

$$h_{sp} = \frac{q''}{T_s - T_o} \quad (4)$$

$$h_{sp} = \frac{q''}{\Delta T_{sat}} \quad (5)$$

Eşitlik (4)'teki T_o ortam sıcaklığı olup, **Eşitlik (5)**'teki ΔT_{sat} yüzey sıcaklığı ile akışkan doyma sıcaklığı arasındaki farktır. Numunenin üst tarafı camdan bir havuz vasıtasıyla kapanmış olup, bu camın iki tarafına manyetik karıştırıcı yerleştirilmiştir. Manyetik karıştırıcılar, deneyler boyunca sisteme sabit 50 rpm açısal dönme hızı sağlamışlardır. Parçacıklar üzerine etki eden manyetik kuvvet **Eşitlik (6)** yardımıyla hesaplanır.

$$F_{mag} = \frac{(X_p - X_c)}{2\mu_0} \nabla \nabla B^2 \quad (6)$$

Bu denklemde, X_p ve X_c sırasıyla manyetik parçacıkların ve suyun manyetik hacim duyarlılığı, ∇

manyetik kuvvet altındaki hacimdir. Parametreler hakkında daha detaylı bilgi [34, 35] referanslarında bulunabilir. Oluşturulan deney düzeneğine hazırlanan su-Fe₃O₄ nano-sıvısı yerleştirilmiş olup deneylere başlanmış ve ölçümler alınmıştır. Deneyler esnasında, ısı akısı küçük aralıklarla artırılmış olup her bir aşamada sıcaklık verileri kaydedilmiştir. Nano-sıvının hazırlanışı ve deney düzeneği hakkında detaylı bilgi için [23] referansı incelenebilir.

Diğer taraftan, eldeki sistem kapalı bir sistem olarak modellenebilir. Bu durumda kapalı bir sistem için ekserji değişim denklemi genel olarak **Eşitlik (7)**'de ifade edilebilir, bakınız referans [36].

$$\left[\left(\text{II. durumdaki} \right)_{\text{ekserji}} - \left(\text{I. durumdaki} \right)_{\text{ekserji}} \right] = \quad (7)$$

$$\left[\begin{array}{c} \text{Isı transferi} \\ \text{sebebiyle} \\ \text{ekserji transferi} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{c} \text{İş sebebiyle} \\ \text{ekserji transferi} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{c} \text{Ekserji} \\ \text{yıkımı} \end{array} \right]$$

Ekserji değişim **Eşitliği (7)**, belirli uygulamalar için farklı formlarda yazılıp daha pratik bir şekilde sonuca gidilebilir. Kapalı bir sistem için ekserji denge denklemi birim zaman biçiminde pratik olarak **Eşitlik (8)** olarak yazılır.

$$\frac{dE}{dt} = \sum_j \left(1 - \frac{T_0}{T_j} \right) \dot{Q}_j - \left(\dot{W} - p_0 \frac{dV}{dt} \right) - \dot{E}_d \quad (8)$$

Kararlı durum için, **Eşitlik (8)**'in sol tarafı ve sağ tarafındaki hacim terimi sıfır olur. Böylece, **Eşitlik (8)** aşağıdaki gibi yazılır ve birim zamandaki ekserji yıkım parametresi elde edilmiş olur.

$$0 = \sum_j \left(1 - \frac{T_0}{T_j} \right) \dot{Q}_j - \dot{W} - \dot{E}_d \quad (9)$$

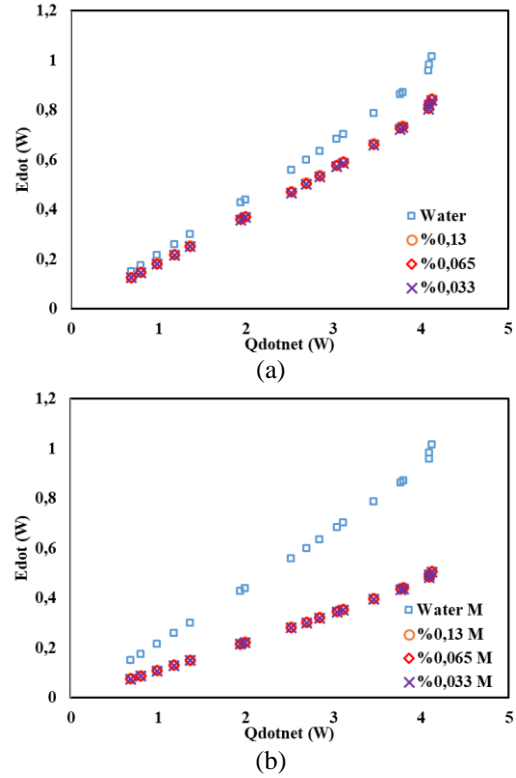
Sistem kararlı duruma geçtikten sonra, ısı akısı küçük aralıklarla artırılarak her bir adımda gerekli veriler alınmıştır. Bu işlem, farklı konsantrasyonlardaki ve manyetik kuvvet altında ve altında olmayan tüm numuneler için tekrarlanmıştır. Bütün testler en az iki defa tekrarlanmış olup ölçümlerin tekrarlanabilirliğinden emin olunmuştur. Öte yandan, deneysel belirsizlik analizi de yapılmış olup, ortalama veri belirsizlikleri sıcaklık ölçümleri ve elektriksel güç için % 2 ekserji yıkım oranı için ise % 3.2 olarak bulunmuştur.

III. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1 Tek Fazlı Isı Transferi Şartlarındaki Ekserji Sonuçları

Bu bölümde, tek-fazlı ısı transferi şartlarında farklı konsantrasyonlardaki Fe₃O₄-su nano-sıvısının ekserji analizi sisteme verilen ısı oranına karşılık gelen ekserji yıkım oranı açısından değerlendirilmiştir. Öte yandan manyetik kuvvet altındaki durumdaki ekserji yıkım

oranı ile manyetik kuvvetin olmadığı durumdaki ekserji yıkım oranı karşılaştırılmıştır. Şekil 3 (a-b)'de manyetik kuvvetin olduğu ve olmadığı durumlardaki farklı konsantrasyonlardaki Fe₃O₄ nano-sıvısının ekserji yıkım oranları karşılaştırılmıştır.

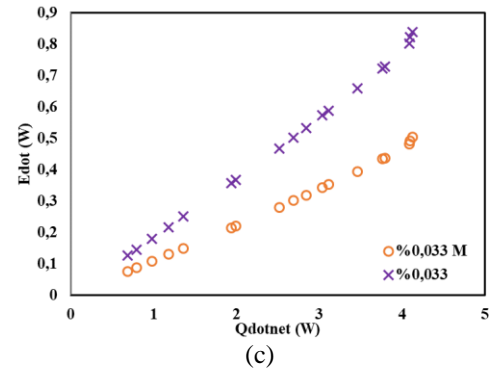
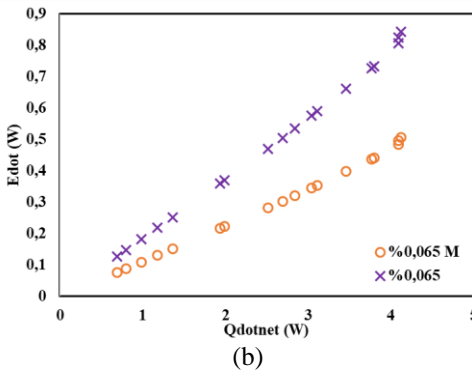
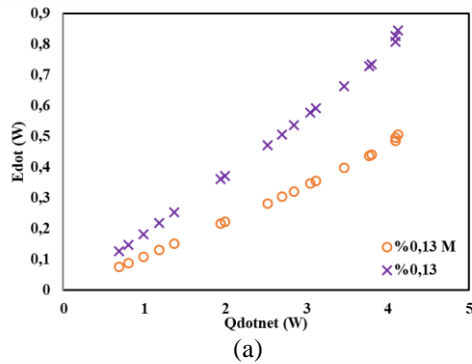


Şekil 3. Tek-fazlı ısı transferi şartlarında farklı konsantrasyonlardaki nano-sıvıların ekserji yıkım oranları karşılaştırılması: a) Manyetik kuvvet yokken, b) Manyetik kuvvet varken

Şekil 3 (a-b) 'de açıkça görülmektedir ki, nano-sıvıların ekserji yıkım oranı manyetik kuvvet yok iken de var iken de saf suyun ekserji yıkım oranından daha azdır, sırasıyla yaklaşık % 20 ve % 75 fark vardır. Şekil 3 (a)'dan da açıkça anlaşılmaktadır ki; nano-parçacıkların sistemin enerji verimliliğinden öte ikinci yasa verimliliğine de pozitif etki etmektedir. Diğer taraftan her iki şekilden de görüldüğü üzere sisteme verilen ısı arttıkça aradaki fark daha da fazla olmaktadır. Bunun sebebi, sisteme verilen ısı arttıkça havuz kaynama şartlarına yaklaşılmaktadır ve havuz kaynama şartlarında nano parçacıkların ısı transferi daha iyidir, bakınız [20, 24]. Bu sebeple, saf su verisi ile nano-sıvılı veri arasındaki ekserji yıkım oranı farkı gittikçe artmaktadır. Şekil 3 (b)'de ise aynı şartlarda manyetik kuvvet uygulandığı zaman ekserji verimliliği durumu gösterilmektedir. Şekildeki eğilim trendi şekil 3 (a)'daki gibi olmasına rağmen çok açık bir şekilde görülmektedir ki; manyetik kuvvet ekserji verimliliğine pozitif yönde etki etmiştir. İki şekilde de dikkat edilecek diğer bir husus, tek-fazlı ısı transferi şartlarında nano-parçacık konsantrasyonunun ekserji yıkım oranına etkisinin olmadığıdır. Bu sonuç şaşırtıcı değildir. Literatürdeki çalışmalarda nano-parçacık

konsantrasyonunun tek fazlı ısı-transferi verimine etkisinden pek bahsedilmemiştir [24]. Nano-parçacık konsantrasyon etkisi çalışmaları daha çok havuz kaynama ya da akış kaynama şartlarında yapılmış olup tek-faz ısı transferi şartlarındaki etkisinden bahsedilmemiştir.

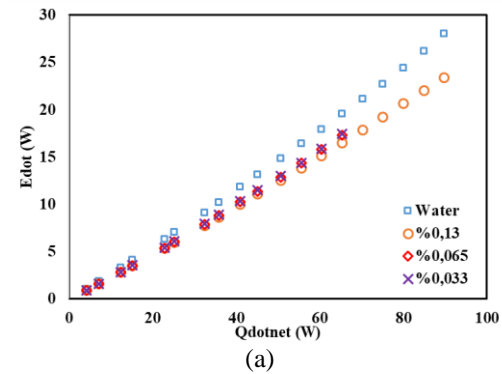
Diğer yandan, şekil 4 (a-c)'de nano-sıvıların tek-fazlı ısı transferi şartlarında manyetik kuvvet altında iken ve manyetik kuvvet olmadan durumdaki ekserji yıkım oranları daha detaylı karşılaştırılmıştır. Görüldüğü üzere manyetik kuvvet altında iken ekserji yıkım oranı diğer duruma göre oldukça düşüktür. Bu sonuçlar enerji verimliliği sonuçları ile paraleldir [23]. Manyetik kuvvet olduğu durumda karışma daha iyi olmakta ve nano-parçacıklar manyetik kuvvetin etkisi ile sürekli hareket halinde döndüklerinden bir nevi ısı taşıyıcısı görevi görerek ısıtıcıdan sıvıya daha hızlı oranda ısı transferi sağlamaktadır. Bunun sonucunda ısı transferi oranı ve sonucunda enerji verimi manyetik kuvvet olmadığı duruma göre daha fazla olmaktadır. Ekserji yıkım oranı **Eşitlik (9)**'da görüldüğü üzere sisteme verilen net ısı oranı ve böylece duvar sıcaklığı ve sistemdeki diğer iş yapan kuvvetlerin fonksiyonudur. Buna göre, ısı transferinin daha iyi olması aynı ısı oranında duvar sıcaklığının daha yüksek olması ve manyetik kuvvetin etkisi **Eşitlik (9)**'da ekserji yıkım parametresini daha düşük yapar ve böylece manyetik kuvvet altındaki durumda enerji verimliliği gibi ekserji verimliliği de daha yüksek çıkar.

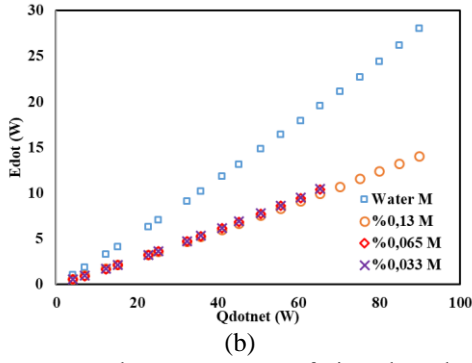


Şekil 4. Tek-fazlı ısı transferi şartlarında farklı konsantrasyonlardaki nano-sıvıların manyetik kuvvet varken ve yokken durumda ekserji yıkım oranları karşılaştırılması: a) % 0,13 konsantrasyonu için, b) % 0,065 konsantrasyonu için, c) % 0,033 konsantrasyonu için

3.2 Havuz Kaynama Isı Transferi Şartlarındaki Ekserji Sonuçları

Bu bölümde, havuz kaynama ısı transferi şartlarında farklı konsantrasyonlardaki Fe_3O_4 -su nano-sıvısının ekserji analizi sisteme verilen ısı oranına karşılık gelen ekserji yıkım oranı açısından değerlendirilmiş ve sonuçlar manyetik kuvvet altındaki durumdaki ekserji yıkım oranı ile manyetik kuvvetin olmadığı durumdaki ekserji yıkım oranı ile karşılaştırılması şeklinde sunulmuştur. Şekil 5 (a-b)'de havuz kaynama ısı transferi şartlarında farklı konsantrasyonlardaki nano-sıvıların ekserji yıkım oranları manyetik kuvvet altında ve manyetik kuvvet yokken sunulmuştur. Tek-fazlı ısı transferi şartlarındaki gibi havuz kaynama şartlarında da nano-sıvıların ekserji yıkım oranı saf suyunkinden azdır. Aradaki fark manyetik kuvvet altında iken daha da açılmaktadır. Öte yandan, tek-fazlı akış şartlarında verilerin lineer eğilimin daha düşüktür. Bunun sebebi açıkça, nano-sıvıların daha fazla aktif parçacık bölgesi oluşturarak havuz kaynama şartlarında daha yüksek ısı transferi oranı sağlaması dolayısıyla daha düşük ekserji yıkım oranı sağlayabilmesidir.

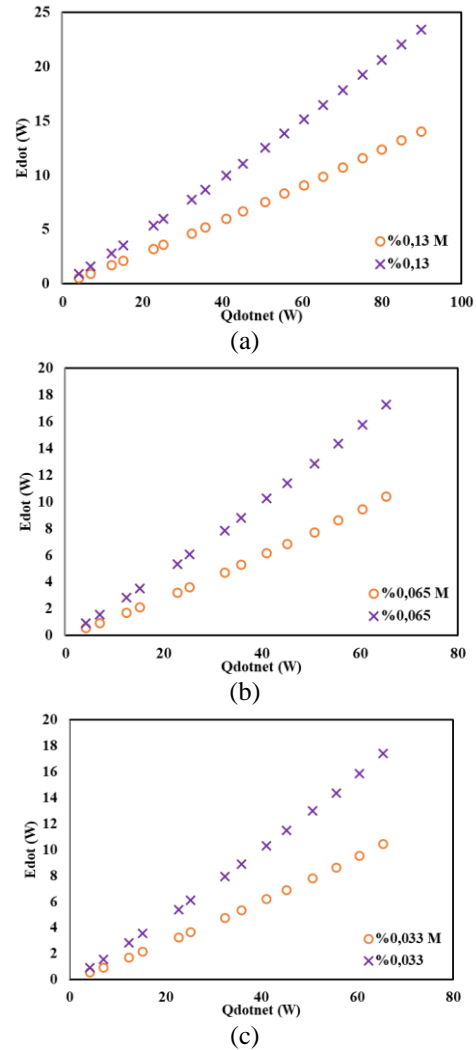




Şekil 5. Havuz kaynama ısı transferi şartlarında farklı konsantrasyonlardaki nano-sıvıların ekserji yıkım oranları karşılaştırılması: a) Manyetik kuvvet yokken, b) Manyetik kuvvet varken

Bu bulgulara ek olarak, her iki şekilde de konsantrasyonun ekserji yıkımına etkisi görülmemiştir. Bu sonuçlar, tek fazlı ısı transferi şartlarındaki sonuçlara benzerdir. Literatürde, havuz kaynama ve akış kaynama ısı transferi şartlarında genellikle nano-parçacık yoğunluğu ile ısı transferinin belli bir noktaya kadar doğru orantılı olarak arttığı fakat bu noktadan sonra nano-parçacık yoğunluğu artışının çökeltme ve kümelenmeden ötürü ısı transferine negatif yönde etki ettiği belirtilmiştir [37, 38]. Çünkü yüksek konsantrasyonda daha yüksek kabarcık yoğunluğu olur ve kalabalıktan ötürü numune yüzeyinin ıslanması zorlaşır ve ısı transferi negatif olarak etkilenir. Lakin ısı transferi veriminin aksine ekserji veriminde bu durum söz konusu olmamaktadır, bakınız Şekil 5 (a-b). Nano-sıvı konsantrasyonunun ekserji yıkım oranına etki etmemesinin sebebi, muhtemelen ekserji yıkım oranının duvar sıcaklığının fonksiyonu olmasıdır. Daha önce de bahsedildiği gibi, ekserji yıkım oranı **Eşitlik (9)** yardımıyla hesaplanabilir. Nano-sıvı fraksiyonu değişimi sisteme verilen aynı ısı oranında duvar sıcaklığına etki edecek kadar güçlü olmamıştır. Öte yandan, sistemde manyetik kuvvetin varlığı direkt olarak **Eşitlik (9)**'a etki edeceğinden ekserji yıkım parametresini daha düşük yaparak ekserji oranını düşürür, bakınız Şekil 6 (a-c). Şekil 6 (a-c)'de havuz kaynama şartlarında manyetik kuvvet altında iken ve manyetik kuvvet olmadan durumdaki ekserji yıkım oranları daha detaylı karşılaştırılmıştır. Görüldüğü üzere tüm konsantrasyonlardaki nano-sıvılarda manyetik kuvvet varken ekserji yıkım oranı manyetik kuvvet olmadığı duruma göre epeyce azdır. Bu sonuçlar bu nano-sıvıların ısı transferi performansları ile paraleldir, bakınız referans [23]. Özdemir vd. [23], manyetik kuvvetin yukarı doğru dış ekstra bir kuvvet oluşturduğu için kabarcık ayrılış prosesine pozitif yönde etki ettiğini belirtmiştir. Yazarlar buna ek olarak, manyetik kuvvetin havuz içerisinde sirkülasyonu arttırdığı ve böylece taşınım ısı transferini hızlandırdığını raporlamıştır. Yazarlar bu bulgularını kamera sonuçlarıyla ve nümerik analiz programlarıyla doğrulamışlardır. Bu durumun sebebi aslında oldukça açıktır. Isı transferini arttıran iki temel mekanizma termoforez ve parçacıkların rastgele hareketidir.

Manyetik kuvvet bunlardan ikinci mekanizma olan rastgele hareketi ciddi manada arttırmakta ve böylece ısı transferi artmaktadır. Hareketin artması çökeltme ve kümelenmenin de çok daha geç olmasını sağlamış ve bu durum ısı transferine pozitif yönde etki etmiştir. Isı transferi artması demek duvar sıcaklığı ile doyma sıcaklığı arasındaki farkın artması demektir. Doyma sıcaklığı sisteme verilen ısı transferi oranı ile orantılı olduğundan buradaki fark manyetik kuvvetin duvar sıcaklığının daha da artmasını sağlamasından kaynaklanmaktadır. Duvar sıcaklığının artması da ekserji yıkım oranı parametresini düşüreceklerinden entropi üretimi düşecektir. Entropi üretiminin düşmesi demek ikinci yasa verimliliğinin artmasına katkı sağlamak demektir. Bu sonuçlardan da anlaşılacağı üzere manyetik kuvvet Fe_3O_4 -su nano-sıvılarına birinci yasa verimliliğinin yanı sıra ikinci yasa verimliliği açısından da katkı sağlamaktadır. Ekserji yıkım oranı manyetik kuvvet altında önemli ölçüde düşmüştür.



Şekil 6. Havuz Kaynama ısı transferi şartlarında farklı konsantrasyonlardaki nano-sıvıların manyetik kuvvet varken ve yokken durumdaki ekserji yıkım oranları karşılaştırılması: a) % 0,13 konsantrasyonu için, b) % 0,065 konsantrasyonu için, c) % 0,033 konsantrasyonu için

IV. SONUÇ VE DEĞERLENDİRMELER

Bu çalışmada, son yıllarda çokça tercih edilen ısı transferi artırma yöntemlerinden biri olan baz sıvıya nano-parçacık ekleme metodunun ikinci yasa analizi yapılmıştır. Üç farklı konsantrasyonlarda hazırlanan Fe₃O₄-su nano sıvısının manyetik kuvvet altında ve manyetik kuvvet olmadığı durumdaki ekserji verimlilikleri tek-fazlı ısı transferi şartlarında ve havuz kaynama ısı transferi şartlarında sunulmuştur. Ekserji verimliliği analizi ekserji yıkım oranı parametresi cinsinden sunulmuştur. Sonuçlara göre, hem tek fazlı ısı transferi hem de havuz kaynama ısı transferi şartlarında nano-sıvıların ekserji verimliliği ana sıvı olan saf suyunkinden daha fazladır. Öte yandan her iki ısı transferi şartlarında da manyetik kuvvetin olduğu durumda ekserji verimliliği manyetik kuvvet olmayan duruma göre daha yüksek olarak bulunmuştur. Lakin havuz kaynama ısı transferi şartları altında manyetik kuvvetin ekserji verimliliğini iyileştirmesi tek fazlı ısı transferi şartlarından daha iyi olarak gözükmiştir. Bunun sebebi, manyetik kuvvetin kabarcıkların hareketini hızlandırması ve dolayısıyla ısı transferini artırması ve duvar sıcaklığını arttırmasıdır. Öte yandan artan duvar sıcaklığı ve oluşan manyetik kuvvet ekserji yıkımını azaltarak ekserji verimliliğinin artmasına sebep olmuştur. Ekserji verimliliği sonuçları enerji verimliliği sonuçları ile paralel olduğundan nano-sıvıların ana sıvılarına kıyasla daha tercih edilebilir olduğu ikinci yasa analizi ile doğrulanmıştır. Diğer taraftan, son zamanlarda birkaç çalışmada yer alan manyetik nano-parçacık kullanarak nano-sıvı oluşturma ve manyetik kuvvetle bu oluşan nano-sıvıya ekstra ısı transferi performansı kazandırma işlemi de ikinci yasa bağlamında incelenmiş olup sonuçlar olumlu bulunmuştur. Bu sonuçların ışığı altında, manyetik kuvvet kullanımının manyetik nano-parçacıklı sistemlerin verimliliğine pozitif yönde etki ettiği ve literatür için bu çalışmalara devam edilebileceği söylenebilir.

SEMBOLLER

A_{ht} : Isı transferi alanı (m²)

B: Manyetik akı yoğunluğu (T)

\dot{E}_d : Ekserji yıkım oranı (W)

F_{mag} : Manyetik kuvvet (N)

h_{sp} : Tek-fazlı ısı transferi katsayısı (W/m²°C)

h_{hp} : Kaynama ısı transferi katsayısı (W/m²°C)

I : Akım (A)

P : Güç (W)

Q_{loss} : Isı enerjisi kaybı (W)

\dot{Q}_{net} : Sisteme verilen net ısı enerjisi (W)

q : Isı Enerjisi (W)

q'' : Isı akısı (W/m²)

p_0 : Referans basınç (Pa)

R_{tot} : Toplam ısı direnç (°C/W)

T_o : Ortam sıcaklığı (°C)

T_s : Yüzey sıcaklığı (°C)

T_w : Duvar sıcaklığı (°C)

V : Voltaj (V)

\dot{W} : İş yoluyla enerji transferinin oranı (W)

X_c : Suyun parçacıkların hacim duyarlılığı (m³/mol)

X_p : Manyetik parçacıkların hacim duyarlılığı (m³/mol)

ΔT_{sat} : Yüzey sıcaklığı ve akışkanın doyma sıcaklığı arasındaki fark (-)

μ_0 : Boş alan geçirgenliği (N/A²)

∇ : Manyetik kuvvet altındaki hacim (m³)

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Marmara Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komitesi tarafından (BAPKO) ile FEN-D-120619-0204 numaralı hibe numarası ile desteklenmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] Karayiannis, T.G., & Mahmoud, M.M., (2017). Flow boiling in microchannels: Fundamentals and applications. *Applied Thermal Engineering*, 115, 1372-1397.
- [2] Mudawar, I., (2011). Two-phase microchannel heat sinks: theory, applications, and limitations. *Journal Of Electronic Packaging*, 133(4), 2-33.
- [3] Kaya, A., Özdemir, M.R., & Koşar, A., (2013). High mass flux flow boiling and critical heat flux in microscale. *International Journal of Thermal Sciences*, 65, 70-78.
- [4] Kang, S.W., Chen, Y.T., & Chang, G.S., (2002). The manufacture and test of (110) orientated silicon based micro heat exchanger. *Tamkang Journal of Science and Engineering*, 5(3), 129-136.
- [5] Özdemir, M.R., Kaya, A., & Koşar, A., (2011). Low mass quality flow boiling in microtubes at high mass fluxes. *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*, 3(4), 1-10.
- [6] Yang, B., Wang, P., & Bar-Cohen, A., (2007). Mini-contact enhanced thermoelectric cooling of hot spots in high power devices. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, 30(3), 432-438.
- [7] Sajid, M.U., & Ali, H.M., (2019). Recent advances in application of nanofluids in heat transfer devices: a critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 103, 556-592.
- [8] Xu, H.J., Xing, Z.B., Wang, F.Q., & Cheng, Z.M., (2019). Review on heat conduction, heat convection, thermal radiation and phase change heat transfer of nanofluids in porous media: Fundamentals and applications. *Chemical Engineering Science*, 195, 462-483.
- [9] Hassan, M., Marin, M., Alsharif, A., & Ellahi, R., (2018). Convective heat transfer flow of nanofluid in a porous medium over wavy surface. *Physics Letters A*, 382(38), 2749-2753.
- [10] Ebrahimnia-Bajestan, E., Moghadam, M.C., Niazmand, H., Daungthongsuk, W., & Wongwises, S., (2016). Experimental and numerical investigation of nanofluids heat

- transfer characteristics for application in solar heat exchangers. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 92, 1041-1052.
- [11] Kakaç, S., & Pramuanjaroenkij, A., (2009). Review of convective heat transfer enhancement with nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52(13-14), 3187-3196.
- [12] Murshed, S.M.S., Leong, K.C., & Yang, C., (2005). Enhanced thermal conductivity of TiO₂—water based nanofluids. *International Journal of Thermal Sciences*, 44(4), 367-373.
- [13] Sundar, L.S., Singh, M.K., & Sousa, A.C., (2013). Investigation of thermal conductivity and viscosity of Fe₃O₄ nanofluid for heat transfer applications. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 44, 7-14.
- [14] Motezakker, A.R., Sadaghiani, A.K., Akkoc, Y., Parapari, S.S., Gözüaçık, D., & Koşar, A., (2017). *Surface modifications for phase change cooling applications via crenarchaeon Sulfolobus solfataricus P2 bio-coatings*. Scientific reports 17891, 7(1), USA.
- [15] Sadaghiani, A.K., Motezakker, A.R., Kasap, S., Kaya, I.I., & Koşar, A., (2018). Foamlike 3D graphene coatings for cooling systems involving phase change. *ACS Omega*, 3(3), 2804-2811.
- [16] Kim, S.H., Lee, G.C., Kang, J.Y., Moriyama, K., Kim, M.H., & Park, H.S., (2015). Boiling heat transfer and critical heat flux evaluation of the pool boiling on micro structured surface. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 91, 1140-1147.
- [17] Kim, B.S., Choi, G., Shim, D.I., Kim, K.M., & Cho, H.H., (2016). Surface roughening for hemi-wicking and its impact on convective boiling heat transfer. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 102, 1100-1107.
- [18] Buongiorno, J., (2015). Convective transport in nanofluid, *Journal of Heat Transfer*, 128(3), 240-250.
- [19] Godson, L., Raja, B., Lal, D.M., & Wongwises, S., (2010). Enhancement of heat transfer using nanofluids—an overview. *Renewable and sustainable energy reviews*, 14(2), 629-641.
- [20] Şeşen, M., Tekşen, Y., Şahin, B., Şendur, K., Pınar Mengüç, M., & Koşar, A., (2013). Boiling heat transfer enhancement of magnetically actuated nanofluids. *Applied Physics Letters*, 102(16), 163107.
- [21] Kurtoğlu, E., Bilgin, A., Şeşen, M., Yıldız, M., Acar, H.F.Y., & Koşar, A., (2012). Ferrofluid actuation with varying magnetic fields for micropumping applications. *Microfluidics and Nanofluidics*, 13(4), 683-694.
- [22] Zuvin, M., Koçak, M., Ünal, Ö., Akkoç, Y., Kutlu, Ö., Acar, H.F.Y., Gözüaçık, D., & Koşar, A., (2019). Nanoparticle based induction heating at low magnitudes of magnetic field strengths for breast cancer therapy. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 483, 169-177.
- [23] Özdemir, M.R., Sadaghiani, A.K., Motezakker, A.R., Parapari, S.S., Park, H.S., Acar, H.F.Y., & Koşar, A., (2018). Experimental studies on ferrofluid pool boiling in the presence of external magnetic force. *Applied Thermal Engineering*, 139, 598-608.
- [24] Şeşen, M., Tekşen, Y., Şendur, K., Pınar Mengüç, M., Öztürk, H., Acar, H.F.Y., & Koşar, A., (2012). Heat transfer enhancement with actuation of magnetic nanoparticles suspended in a base fluid. *Journal of Applied Physics*, 112(6), 320-326.
- [25] Bejan, A., (2016). Entropy generation and exergy destruction. In: *Advanced Thermodynamics*, 4. Baskı, John Wiley & Sons, USA, s. 95-140.
- [26] Gümüş, M., & Atmaca, M., (2013). Energy and Exergy Analyses Applied to a CI Engine Fueled with Diesel and Natural Gas. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 35, 1017 – 1027.
- [27] Kanoglu, M., Dincer, I., & Rosen, M.A., (2008). Exergetic performance investigation of a turbocharged stationary diesel engine. *International Journal of Exergy*, 5(2), 193-203.
- [28] Rosen, M.A., Dincer, I., & Kanoglu, M., (2008). Role of exergy in increasing efficiency and sustainability and reducing environmental impact. *Energy policy*, 36(1), 128-137.
- [29] Khaleduzzaman, S.S., Sohel, M.R., Saidur, R., Mahbulbul, I.M., Shahrul, I.M., Akash, B.A., & Selvaraj, J., (2014). Energy and exergy analysis of alumina–water nanofluid for an electronic liquid cooling system. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 57, 118-127.
- [30] Esfahani, M.R., & Languri, E.M. (2017). Exergy analysis of a shell-and-tube heat exchanger using graphene oxide nanofluids. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 83, 100-106.
- [31] Said, Z., Saidur, R., & Rahim, N.A., (2016). Energy and exergy analysis of a flat plate solar collector using different sizes of aluminium oxide based nanofluid. *Journal of Cleaner Production*, 133, 518-530.
- [32] Mukherjee, S., Mishra, P.C., & Chaudhuri, P., (2019). Energy and Exergy Viability Analysis of Nanofluids As A Coolant for Microchannel Heat Sink. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, 16(1), 6090-6107.
- [33] Fayaz, H., Nasrin, R., Rahim, N.A., & Hasanuzzaman, M., (2018). Energy and exergy analysis of the PVT system: Effect of nanofluid flow rate. *Solar Energy*, 169, 217-230.
- [34] Juha, P., Tapani, J., & Valeria, H., (2009). Design of magnetic circuits. In: *Design of rotating electrical machines*, 2. baskı, Wiley, USA, s. 155-227.
- [35] Sagawa, M., Fujimura, S., Togawa, N., Yamamoto, H., & Matsuura, Y., (1984). New material for permanent magnets on a base of Nd

-
- and Fe. *Journal of Applied Physics*, 55(6), 2083-2087.
- [36] Moran, M.J., Shapiro, H.N., Boettner, D.D., & Bailey, M.B., (2010). Exergy Analysis. In: *Fundamentals of engineering thermodynamics*, 9. baskı, Wiley, USA, s. 272-315.
- [37] Karimzadehkhoei, M., Şendur, K., Mengüç, M.P., & Koşar, A., (2017). The effect of nanoparticle type and nanoparticle mass fraction on heat transfer enhancement in pool boiling. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 109, 157-166.
- [38] Reddy, P.S., & Chamkha, A.J., (2016). Influence of size, shape, type of nanoparticles, type and temperature of the base fluid on natural convection MHD of nanofluids. *Alexandria Engineering Journal*, 55(1), 331-341.

Stabilization and DOB-Based Disturbance Rejection for MBT Gun-Barrel Elevation Drive

Savaş Tankı Namlu Yükseliş Açısı Tahrik Sistemi Stabilizasyonu ve DOB-Temelli Bozucu Dışlama

İ. Sina KUSEYRİ¹ 

¹Marmara University, Mechanical Engineering Department, 34722, Istanbul, Turkey

Abstract

Control systems for main battle tanks become more important while the vehicles become more complex. Mobile vehicles in battlefield lead to the requirement of firing during the motion instead of pausing each time the main battle tank engages a target. This demand can be achieved by weapon control system that minimize the tank hull movement effects on the barrel. Systems designed for this stabilization task are basically closed loop servo systems that control the angular position of the barrel by using feedback signals produced by a rate gyroscope mounted on the barrel (breech) to measure its angular velocity. Second-generation control systems contain an extra gyro which feeds the tanks movement forward in the system to make the turret more sensitive and rapid against the disturbance due to tanks movement. In this paper we use a disturbance observer that do not require measurements of muzzle angular velocity and rough terrain caused disturbance due to tank movement. Designed observer eliminate the requirement for measurements of near-perfect feedforward signal.

Keywords: Gun-barrel stabilization, dynamic modeling, linear control, disturbance observer, battlefield simulation.

Öz

Savaş tanklarındaki son yıllardaki gelişmeler kullanılan kontrol sistemlerini daha önemli hale getirmiştir. Bu araçların savaş alanında hareket halinde olması, bir hedefe ateş etme sırasında durmak yerine hareket esnasında ateş etmelerini gerekli kılmaktadır. Bu gereklilik, tank gövdesi hareketlerinin namluya olan etkisini minimize eden silah kontrol sistemi ile sağlanabilir. Bu stabilizasyon işlevi için namlu üzerine monte edilen jiroskoptan alınan açısal konumun geri beslemesiyle çalışan kapalı-çevrim servo kontrol sistemleri kullanılır. İkinci nesil kontrol sistemlerinde, tank gövdesinin hareketi nedeniyle oluşan bozucu etkilere karşıtarette daha hassas ve hızlı kılan, ileri beslemeli kontrol için ekstra bir jiroskop daha kullanılır. Bu makalede ise tankın hareketi nedeniyle oluşan bozucu etkilerin ölçülmesi ihtiyacını ortadan tamamen kaldıran bir 'bozucu etki gözleyicisi' kullanılmaktadır. Tasarlanan gözleyici sayesinde bozucu etkinin hatasız olarak ölçülmesi ve ileri besleme kontrol ile elimine edilmeye çalışılması gerekliliği ortadan kalkmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Dinamik modelleme, doğrusal kontrol, bozucu etki gözleyicisi, savaş alanı simülasyonu, namlu stabilizasyonu

I. INTRODUCTION

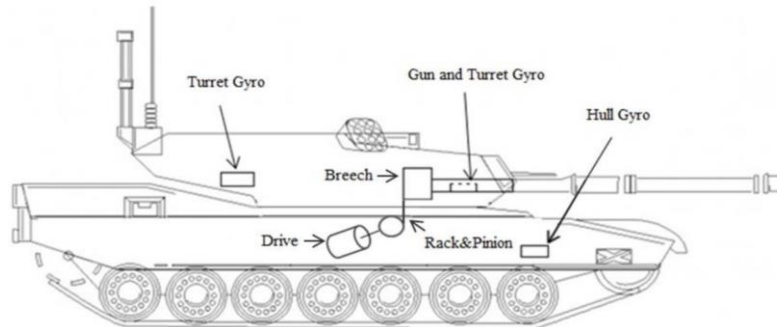


Figure 1: MBT and gyro locations

Modern armored land vehicles have crucial importance on today's battlefield. However, due to their large size and relatively low speed, they can often be an obvious target while traversing rugged, harsh terrain. Their ability to locate a target accurately and stabilizing the gun-barrel during the shot while moving out of the line-of-sight can make all the difference. Main Battle Tank (MBT) is probably the most important weapon in battle_eld due to its mobility and heavy-fire capacity. Developments on MBT follow the improvements in design of heavy weaponry, Weapon Control Systems (WCS) and enhanced mobility. WCS have become more crucial while the MBT have evolved into larger and more complex systems. Mobile vehicles in battlefield lead to the requirement of firing during the motion instead of pausing each time the main battle tank engages a target. This demand can be achieved by weapon control system that minimize the tank hull movement effects on the barrel. It is expected that gunners minimize this disturbance by manually rotating the barrel in the opposite direction of the hull motion. But although the frequency of this motion ranges from 0 to 4 Hz, the response of the human operators is limited to a maximum 0.5 Hz [1]. Therefore, the effects of disturbance on the barrel can only be minimized by automatic control systems which are designed to stabilize the barrel position during the vehicle motion.

Systems designed for this stabilization task are basically closed loop servo systems that control the angular position of the barrel by using feedback signals produced by a rate gyroscope mounted on the barrel (breech) to measure its angular velocity. Feedback control systems are proved to be somewhat effective, but rapidly correcting the stabilization errors during tank motion on a rough terrain to a sufficiently low level was not easy for the operators. This problem led to the "second-generation" control systems in early sixties. These systems contain an extra gyro which feeds the tanks movement forward in the system to make the turret more sensitive and rapid against the tanks movement (Figure 1). Usually hull feedforward gyro measures the disturbance acting on yaw motion and the turret feedforward gyro measures the disturbance on pitch motion of the tank. This method lowers the stabilization error by 50 % of the error in basic systems [1].

In [2] control performance for balanced and out of balanced turret-barrel structures are compared using a 2-dof barrel model. Feedback control is complemented with feedforward control in [3] using field measured disturbance data. In [4] elevation and azimuth dynamics of MBT is derived including a half-vehicle suspension system model. PID, LQR and back-stepping control is used and compared in [5] using a 2-dof barrel model incorporated with suspension system dynamics. Continuous exible and rigid models of barrel and the drive line are investigated and compared

in [6]. Model predictive control is used in [7] to handle the constraints in barrel motion. In [8] active disturbance rejection control method is used incorporating nonlinear disturbance model and the performance is compared with respect to PID control.

Control applications often assume availability of near-perfect feedback (and/or feedforward) signals. However, such an assumption is often invalid. Firstly, sensors are expensive and they can substantially raise the total cost of a control system. Second, sensors and their associated wiring reduce the reliability of control systems. Third, some signals are impractical to measure. Fourth, sensors usually induce significant errors such as stochastic noise, cyclical errors, and limited responsiveness. Hence, in this paper, we have used a disturbance observer (DOB) to eliminate the hull gyro for disturbance measurement. Using a DOB, we have eliminated the disturbance acting on the system up to the bandwidth of the observer's low pass filter [9]. Moreover, DOB also provides robustness with respect to modeling errors [10].

The paper is organized as follows: In Section 2 we derive the dynamic model of the elevation control system. In Section 3 we present the concept of observer based control. In Section 4 we show the numerical simulation results of the closed-loop feedback control system using a DOB in the inner loop and PI controller in the outer loop. In Section 5 we present our final comments.

II. SYSTEM MODEL

Model of the elevation system consists of the drive line and the gun barrel is shown in Figure 2. Model is based on lumped parameter beam formulation. The gun-barrel is divided into two parts, muzzle and breech sections, which somewhat provides means to analyze flexible behavior of the barrel. The elevation drive consists of an electric motor, providing the required torque to rotate gun-barrel in vertical plane about the trunnion support. Model consists of the rotational degrees of freedom θ_d , θ_l and θ_2 for the drive, breech and muzzle sections, respectively, with respect to their center of gravity (CG) locations. Tank hull may get inclined during its motion on a rough terrain with a pitch angle θ_p relative to the horizontal axis. Model also incorporates vertical translational degrees of freedom x_1 and x_2 for the breech and muzzle sections, respectively, measured relative to their CG locations. Elevation motor drives a pinion, which transforms the torque generated to breech section using rack and pinion mechanism. Torsional damping imposed by the hinge joint of the trunnion is considered to be linear viscous damping in the model. The connection of breech and muzzle sections is modeled to be a hinge joint, with linear torsional stiffness and linear torsional viscous damping characteristics. The trunnion may also have a vertical displacement y_t during tanks motion on the field.

Rotational dynamics of the drive system, and breech and muzzle sections are:

$$I_d \ddot{\theta}_d + c_d \dot{\theta}_d + k_d(\theta_d R_p + (\theta_p - \theta_1) X_{tp}) R_p = K_t v_i, \quad (1a)$$

$$I_1 \ddot{\theta}_1 + c_{1p}(\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_p) + f_t \eta_1 - c_{12}(\theta_2 - \theta_1) - k_{12}(\theta_2 - \theta_1) - k_d(\theta_d R_p + (\theta_p - \theta_1) X_{tp})(X_{tp} + \eta_1) + f_{12}(l_1 - \eta_1) = 0, \quad (1b)$$

$$I_2 \ddot{\theta}_2 + c_{12}(\dot{\theta}_2 - \dot{\theta}_1) + k_{12}(\theta_2 - \theta_1) + f_{12} \eta_2 = 0. \quad (1c)$$

Translational equations of motion for the breech and muzzle sections of the barrel are:

$$m_1 \ddot{x}_1 - f_t + k_d(\theta_d R_p + (\theta_p - \theta_1) X_{tp}) + f_{12} = 0, \quad (2a)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 - f_{12} = 0. \quad (2b)$$

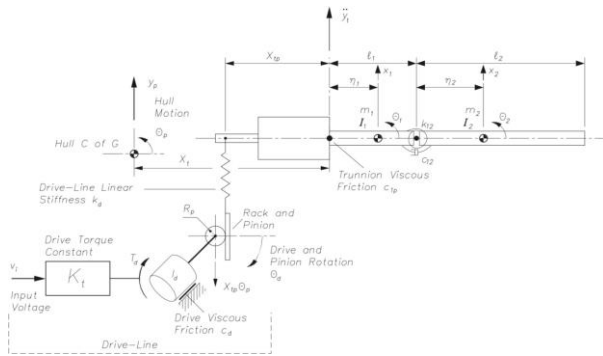


Figure 2: Elevation drive model [2]

In the set of equations (1) and (2), f_t and f_{12} are the reaction forces applied by the trunnion to the breech and by the breech to the muzzle sections respectively. Furthermore, we have geometric constraints for the elevation dynamics to read

$$x_1 = y_t + \theta_1 \eta_1, \text{ and } x_2 = y_t + \theta_1 l_1 + \theta_2 \eta_2.$$

Using the geometric constraints to eliminate the translational equations of motion and substituting the equations (2) into equations (1) to also eliminate the constraint forces, one can obtain the system dynamics in multivariable matrix form

$$M \ddot{\theta} + D \dot{\theta} + K \theta = F u, \quad (3)$$

where $\theta := (\theta_d \theta_1 \theta_2)^T$ and $u := (v_i \dot{y}_t \dot{\theta}_p \theta_p)^T$. Matrices M, D, K, F in (3) are

$$M = \begin{pmatrix} I_d & 0 & 0 \\ 0 & I_1 m_1 \eta_1^2 + m_2 l_1^2 & m_2 l_1 \eta_2 \\ 0 & m_2 l_1 \eta_2 & I_2 + m_2 \eta_2^2 \end{pmatrix}, \quad D = \begin{pmatrix} c_d & 0 & 0 \\ 0 & c_{1p} + c_{12} & -c_{12} \\ 0 & -c_{12} & c_{12} \end{pmatrix},$$

$$K = \begin{pmatrix} k_d R_p^2 & -k_d R_p X_{tp} & 0 \\ -k_d X_{tp} R_p & k_{12} + k_d X_{tp}^2 & -k_{12} \\ 0 & -k_{12} & k_{12} \end{pmatrix}, \quad F = \begin{pmatrix} K_t & 0 & 0 & -k_d X_{tp} R_p \\ 0 & -(m_1 \eta_1 + m_2 l_1) & c_{1p} & k_d X_{tp}^2 \\ 0 & -m_2 \eta_2 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Finally, system dynamics can be represented by the state-space equations

$$\dot{\xi} = A \xi + B u \text{ and } y = C \xi \quad (4)$$

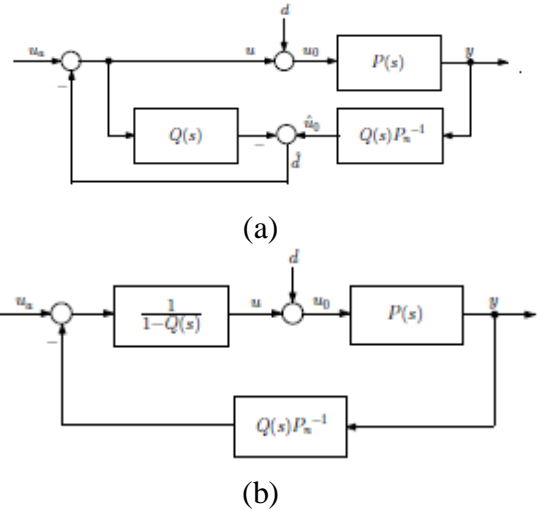


Figure 3: Equivalent block diagrams for DOB-based disturbance rejection

with the states $\xi = (\theta_d \theta_1 \theta_2 \dot{\theta}_d \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2)^T$ and with the system and input matrices

$$A = \begin{pmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}D \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} 0 \\ M^{-1}F \end{pmatrix}.$$

Matrix C depends on the output(s) of interest or on the measurement(s) available.

III. DOB-BASED CONTROLLER DESIGN

Disturbance observer (DOB) is an effective method to achieve robustness against disturbances and model uncertainties. DOB provides an estimate \hat{d} of the disturbance d , which is used to perform a compensation using a negative feedback loop. The DOB is used only for disturbance rejection; an additional outer control loop, as shown in Figure 2, is still required to achieve the desired control performances. Figure 3 shows two equivalent block diagrams of the DOB system. A low-pass filter $Q(s)$ is necessary because the inverse $P_n^{-1}(s)$ of the nominal plant model $P_n(s)$ is usually not a proper transfer function. Analysis of DOB feedback loop leads to the transfer functions

$$G_{uay}(s) := \frac{Y(s)}{U_a(s)} = \frac{P(s)P_n(s)}{Q(s)[P(s) - P_n(s)] + P_n(s)}$$

$$G_{dy}(s) := \frac{Y(s)}{D(s)} = \frac{P(s)P_n(s)[1 - Q(s)]}{Q(s)[P(s) - P_n(s)] + P_n(s)}$$

revealing that if the nominal plant is correct (i.e., $P_n(s) = P(s)$), $G_{uay}(s) = P(s)$, and $G_{dy}(s) = P(s)[1 - Q(s)]$. The condition $G_{uay}(s) = P(s)$ implies that the DOB is “transparent” to the outer loop controller, i.e., it does not affect the dynamics from u_a to y . Hence, as long as the nominal model is correct, the DOB and the outer controller can be designed independently. The DOB design is essentially a matter of selecting the low-pass filter $Q(s)$. A commonly used structure is [9]

$$Q(s) = \frac{1 + \sum_{k=1}^{N-r} a_k(\tau s)^k}{1 + \sum_{k=1}^N a_k(\tau s)^k} \tag{5}$$

where N , r , and $\omega_c = 1/\tau$ are the order, relative degree, and cut-off frequency of $Q(s)$ respectively. The coefficients a_k of the denominator are usually chosen as the coefficients of Butterworth or binomial polynomial.

Regarding the modeling errors end uncertainties (i.e., $P_n(s) \neq P(s)$), note that $Q(s) \approx 0$ at high frequencies, and

$$G_{u_{ay}}(s) \approx \frac{P(s)P_n(s)}{P_n(s)} = P(s), \quad G_{dy}(s) \approx \frac{P(s)P_n(s)}{P_n(s)} = P(s).$$

Hence DOB loop behaves like the real plant. However, at low frequencies where $Q(s) \approx 1$,

$$G_{u_{ay}}(s) \approx \frac{P(s)P_n(s)}{P(s)} = P_n(s), \text{ and } G_{dy}(s) \approx 0.$$

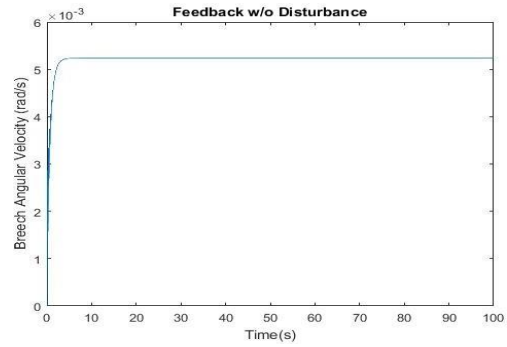


Figure 4: Breech angular position tracking reference 0.3 deg/s input

Therefore, at sufficiently low frequencies, DOB loop nominalizes the dynamics of the plant to be controlled and eliminates the effect of disturbance.

IV. NUMERICAL SIMULATIONS AND RESULTS

In this section we design state and disturbance observers and we synthesize feedback PID controllers for a MBT gun-barrel system. Performance of observer based controllers are established and compared with standard controllers.

4.1. System Data

Numerical data for the MBT gun-barrel is given in Table 1, which is adapted from [4].

Table 1: MBT Gun-Barrel Data

Symbol	Value	Unit	Symbol	Value	Unit	Symbol	Value	Unit
X_t	1.00	m	c_{1p}	1.50	kNms/rad	c_{12}	2.00	kNms/rad
X_{tp}	0.75	m	m_1	2.17	Mg	m_2	335	kg
k_d	6.00	MNm/rad	I_1	1.09	Mgm ²	I_2	0.31	kgm ²
c_d	1.50	kNms/rad	l_1	1.75	m	l_2	281	kgm ²
R_p	0.04	m	η_1	0.47	m	η_2	1.32	m
I_d	0.50	kgm ²	k_{12}	4.00	MNm/rad	K_t	15.0	kNm/V

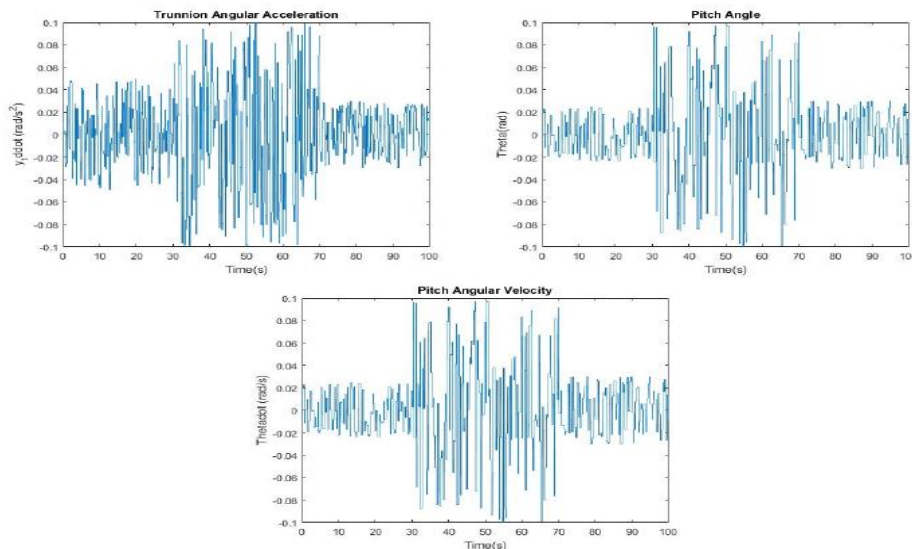


Figure 5: Field measured disturbances during motion

4.2. Controller Design and Simulations in Stand Still

Main controller in outer-loop feedback (Figure 3) can be designed by root locus method to track a step reference of 0.3 deg/s. Using a PI controller, gains are found to be $K_p=1$, $K_i = 5.26$. Angular velocity of the breech without disturbance effects is shown in Figure 5. We desire to elevate the muzzle to 30 degrees but due to 2.5 sec settling time delay, we have 0.17 degrees (0.3 mrad) error in the angular position. However, this is below the accepted tolerance which is 0.5 mrad [1].

4.3. Controller Design and Simulations During Motion

Field measured disturbances on MBT during motion [3] are shown in Figure 6. Disturbances are injected to the plant (MBT) and the simulated breech angular velocity in open loop and closed-loop with the PI feedback controller at constant barrel angular position are shown in Figure 7. It is clear from the plots that basic feedback control has no effect on eliminating the effect of rough terrain disturbance. It is well known that feedforward (FF) control based on disturbance measurement to complement the feedback control system can provide better performance on disturbance rejection problems. This method is used in Type 2 MBT control systems [1] and it has been implemented successfully in weapon control technology and in related research such as [3]. However, it requires an additional gyro to measure terrain disturbance. To eliminate this additional sensor requirement

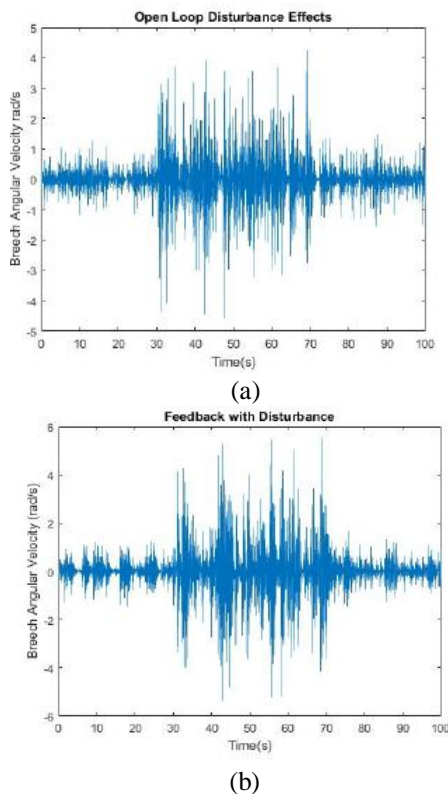


Figure 6. Effect of disturbance on breech angular velocity

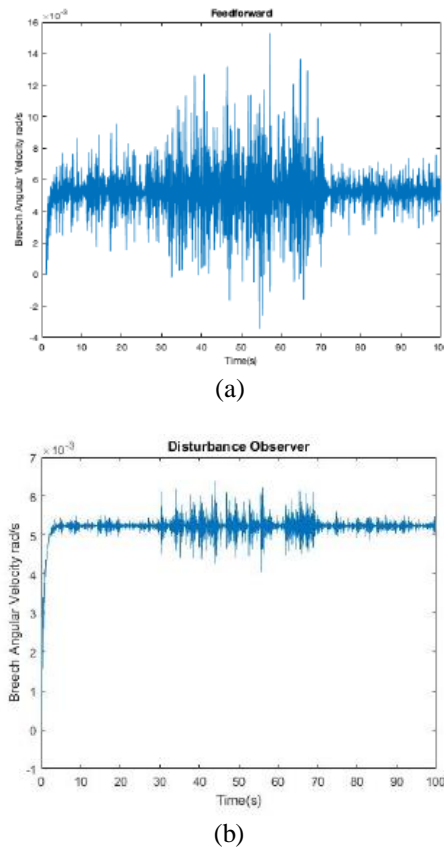


Figure 7. Disturbance rejection performance with FF versus DOB control

we have designed a DOB controller as shown in Figure 4. Transfer function of DOB controller's low pass filter in accordance with equation (6) is $Q(s) = 1/(s^3+3s^2+3s+1)$. Disturbance rejection performance of the control system using feedforward control (incorporating the same LP filter) versus DOB integrated control with 0.3 deg/s step breech velocity input is shown in Figure 8. It is clear that DOB based control system outperforms FF control in this problem.

V. CONCLUSIONS

In this paper we have studied the dynamics and observer based stabilization of a main battle tank elevation system. We have derived the dynamics of the elevation drive incorporating 2-dof to reflect the flexibility of the gun-barrel. We have used a disturbance observer to eliminate the effects of disturbance on a rough terrain instead of the commonly used feedforward control with gyro measurement. Simulation results are presented to show the stabilization performance of the system with the synthesized controllers. We observed that PI feedback controller provides sufficient performance in stand still for precise gun orientation towards the target. However, when MBT moves on a rough terrain basic feedback control cannot attenuate the disturbance. We have incorporated a DOB to feedback control to eliminate the effect of disturbance and we have compared its performance with the system using FF

control. It is evident that DOB based control system outperforms the system with FF control in this problem.

REFERENCES

- [1] Ogorkiewicz R.M., (1991). Technology of tanks, Vol. 1, Janes Information Group Limited.
- [2] Purdy D.J., (1991). Comparison of balance and out of balance main battle tank armaments, Sound and Vibration, vol. 8, pp. 167-174.
- [3] Karayumak T., (2011). Modeling and stabilization control of a main battle tank, PhD Thesis, METU.
- [4] Shukla, J., (2018). Modelling and Simulation of Main Battle Tank to Stabilize the Weapon Control System, SAE Technical Paper, 2018-28-0078.
- [5] Jakati A., Banerjee S., Jebaraj C., (2017). Development of dynamic models, simulating vibration control of tracked vehicle weapon dynamics, Defence Science Journal, vol. 67, no. 4, pp. 465-475.
- [6] Purdy D.J., (2002). Theoretical investigation into the modeling of a flexible beam with driveline compliance, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, no. 216, pp. 813-829.
- [7] Kumar D.G., Tiwari P.Y., Marcopoli V., Kothare M.V., (2009). A study of a gun-turret assembly in an armored tank using model predictive control, Proceedings of American Control Conference, St. Louis, MO, pp. 4848-4853.
- [8] Xia Y., Dai L., Fu M., Li C., Wang C., (2014). Application of active disturbance rejection control in tank gun control system, Journal of the Franklin Institute, vol. 351, no. 4, pp. 2299-2314.
- [9] Schrijver E., Van Dijk J., (2002). Disturbance observers for rigid mechanical systems: Equivalence, stability, and design, ASME Journal of Dynamic Systems Measurement and Control, vol. 124, no. 4, pp. 539-548.
- [10] Sarıyıldız E., Ohnishi K., (2015). Stability and robustness of disturbance-observer-based motion control systems, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 62, no. 1, pp. 414-422.