

Production of Al-Si₃N₄ Powder Metal Composite Material and Investigation of Wear Behavior

Halil ARIK 

Gazi University Faculty of Technology, Department of Metallurgical and Materials Engineering, 06500, Yenimahalle/ANKARA

Graphical/Tabular Abstract

Article Info:

Research article

Received: 17/09/2019

Revision: 01/10/2019

Accepted: 06/10/2019

Highlights

- Distribution of Si₃N₄ in matrix structure.
- Improving of wear performance of composite

Keywords

Powder Metallurgy,
 Composite Material,
 Al-Si₃N₄,
 Wear Behaviors.

In this study, it is aimed to determine the effect of Si₃N₄ ratio on wear behavior of aluminum matrix composite material produced by powder metallurgy method. Mixed aluminum powders containing 5 %, 10% and 15% by weight α -Si₃N₄ were pressed in the die under 500 MPa pressure and 10 mm diameter and 15 mm length block samples were produced. Then pressed samples were sintered in an atmosphere controlled tube furnace for 2 hours at 650 °C. After the characterization study such as density and hardness measurements, dry sliding wear test all of the composite materials were performed by using pin-on-disk method. The tests were carried out on the TIRIBOMETER T10 / 20 abrasion tester according to ASTM G99-05. Dry sliding wear tests of composite were carried out under the different load (5-10-15 N) and at 1.41 m/s sliding speed for 2000 m wear distance. Wear test results showed that composite materials containing silicon nitride at different ratio have better wear resistance according to matrix powder metal parts produced under the same conditions.

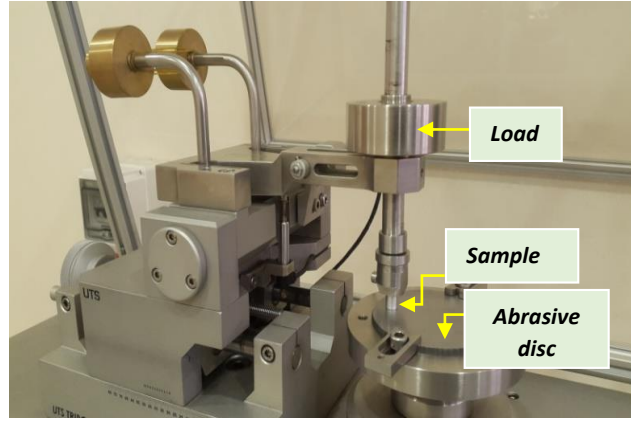


Figure A. Abrasion tester machine

Purpose: The main purpose of this study, investigation of the effects of α -Si₃N₄ as a reinforcing element on the wear performance of aluminum matrix composite materials.

Theory and Methods: In this study, for Al- α -Si₃N₄ composite materials, powder metallurgy as a production method and dry sliding pin-on disc method as wearing method were used

Results: The homogeneous distribution of Al- α -Si₃N₄ powders in each other has been accomplished successfully by mixing process in the adritor. The hardness values of all samples increased after the sintering process. when silicon nitride ratio used in matrix structure increased hardness of composite materials increased also. According to the abrasion test results, while the applied load increased, amount of wear losses increased in all samples. Wear losses decreased while reinforcing ratio increased in composite.

Conclusion: It was observed that density, hardness and abrasion performance of composite samples produced by powder metallurgy method improved considerably according to matrix material.

GU J Sci, Part C, 7(4): 776-787 (2019)



Gazi Üniversitesi

Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ


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

Al-Si₃N₄Toz Metal Kompozit Malzeme Üretimi ve Aşınma Davranışının Araştırılması

Halil ARIK 

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

Öz

Alüminyum ve alaşımları başta otomotiv ve havacılık sektörü olmak üzere pek çok alanda tercih edilen metal ve alaşım grubunu oluşturmaktadır. Alüminyum alaşımlarının üstün özellikleri yanında sertlik ve aşınma direnci gibi özelliklerinin bazı uygulamalarda beklentilerin uzağında kalması alüminyum matrisli kompozit malzeme üretimi çalışmalarını daha değerli ve gerekli kılmaktadır. Bu çalışmada toz metalürjisi metodu ile üretilen α -Si₃N₄ içeren alüminyum matrisli kompozit malzemelerde takviye elemanı oranının kompozitin aşınma davranışı üzerine etkilerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Ağırlıkça %5, %10 ve %15 oranlarında α -Si₃N₄ içeren karışım tozlar kalıp içerisinde 500 MPa basınç altında preslenerek 10 mm çapta ve 15 mm boyda blok numuneler üretilmiştir. Daha sonra preslenen numuneler atmosfer kontrollü tüp fırında 2 saat süreyle 650 °C sıcaklıkta sinterlenmiştir. Toz metal kompozit parçaların yoğunluk ve sertlik ölçümleri sonrası pin-on-disk metoduyla kuru kayma aşınma testleri yapılmıştır. Testler TIRIBOMETER T10/20 aşındırma test cihazında ASTM G99-05' göre yapılmıştır. Aşındırma testleri 1,41 m/s kayma hızı ve 2000 m mesafede farklı yükler (5-10-15 N) altında tekrarlanmıştır. Alınan aşınma test sonuçları aynı şartlarda üretilen matris malzemeye göre değişik oranlarda α -Si₃N₄ takviyeli kompozitlerin daha iyi aşınma direncinde sahip olduğunu göstermektedir. En yüksek aşınma direnci ve sertlik değerleri ağırlıkça % 15 silisyum nitrür içeren kompozit malzemede görülmüştür.

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 17/09/2019
Düzeltilme: 01/10/2019
Kabul: 06/10/2019

Anahtar Kelimeler

Toz Metalurjisi,
Kompozit Malzeme,
Al-Si₃N₄,
Aşınma Davranışı.

Keywords

Powder Metallurgy,
Composite Material,
Al-Si₃N₄,
Wear Behaviour.

Production of Al-Si₃N₄ Powder Metal Composite Material and Investigation of Wear Behavior

Abstract

Aluminum and its alloys as a structural materials are preferred in many fields, especially in the automotive and aerospace sectors. Conversely to many superior properties of aluminum and its alloys the fact that its properties such as hardness and wear resistance are far from the expectations in some applications makes the production of aluminum matrix composite materials more valuable and necessary. In this study, it is aimed to determine the effect of Si₃N₄ ratio on wear behavior of aluminum matrix composite material produced by powder metallurgy method. Mixed aluminum powders containing 5 %, 10% and 15% by weight α -Si₃N₄ were pressed in the die under 500 MPa pressure and 10 mm diameter and 15 mm length block samples were produced. Then pressed samples were sintered in an atmosphere controlled tube furnace for 2 hours at 650 °C. After the characterization study such as density and hardness measurements, dry sliding wear test all of the composite materials were performed by using pin-on-disk method. The tests were carried out on the TIRIBOMETER T10 / 20 abrasion tester according to ASTM G99-05. Dry sliding wear tests of composite were carried out under the different load (5-10-15 N) and at 1.41 m/s sliding speed for 2000 m wear distance. Wear test results showed that composite materials containing silicon nitride at different ratio have better wear resistance according to matrix powder metal parts produced under the same conditions. The highest wear resistance and hardness values were seen at composite materials.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Alüminyum ve alaşımları hafif olmaları, ısı ve elektriği iyi iletmeleri, oksidasyon dirençlerinin ve özgül ağırlıklarına oranla yüksek mukavemete sahip olmalarından dolayı uzay ve havacılık başta olmak üzere

pek çok sektörde yoğun şekilde tüketilmektedir. Buna karşılık yüksek sıcaklık ve aşındırıcı ortamlardaki performansının beklentilerin gerisinde kalması alüminyum matrisli ve seramik parçacık takviyeli kompozit malzeme üretimi üzerine yapılan çalışmalara hız vermiştir. Alüminyum matrisli seramik takviyeli kompozit malzeme üretimi genel olarak ergiyik veya katı hal yöntemi şeklinde gerçekleştirilmektedir [1-5]. Ergiyik yöntemle kompozit üretiminde ergiyik metal içerisine değişen oranlarda bir veya daha fazla tür seramik esaslı SiC, Al₄C₃, B₄C, Al₂O₃, Si₃N₄ gibi karbür, oksit veya nitrür tipi katı parçacık şeklinde takviye elemanı ilavesi yapılarak kompozit üretimi gerçekleştirilmektedir. Katı hal yöntemi olarak ise yoğun şekilde toz metalürjisi metodu ile toz metal kompozit parça üretimi yapılmaktadır [6-11].

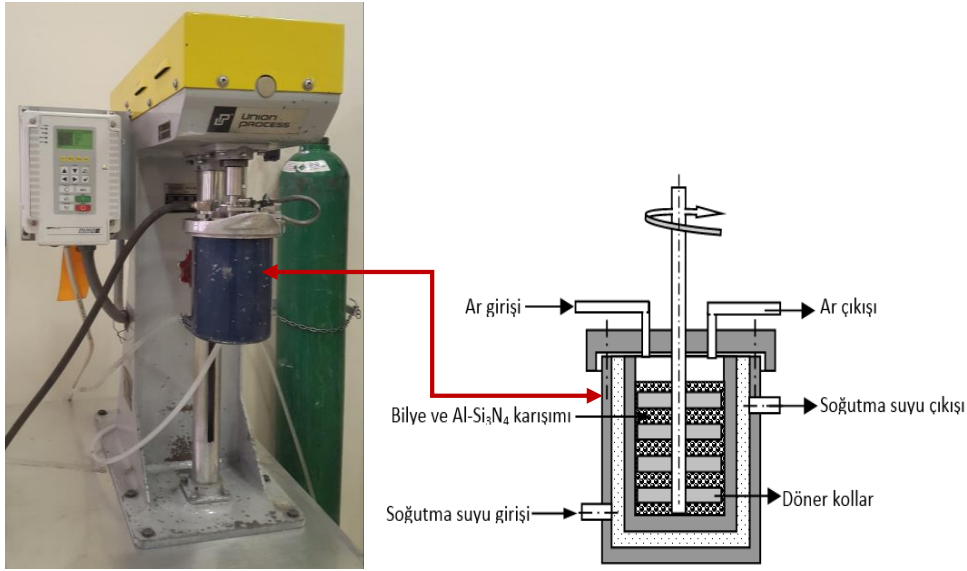
Bu yöntemle üretimde alüminyum-seramik karışım tozların kalıp içerisinde preslenmesi sonrası atmosfer kontrollü ortamlarda uygun sıcaklık ve sürede sinterlenmesi veya presleme ve sinterlemenin aynı anda gerçekleştirildiği sıcak presleme şeklinde üretim yapılabilmektedir [12-14]. Katı hal yöntemine göre ergiyik yöntemle daha yoğun ve mukavim kompozit malzeme üretimi yapılabilirken seramik partiküllerin matris yapı içindeki dağılımında görülen düzensizlikler ve ergiyik matris yapı tarafından katı seramik partiküllerin ıslatılabilirliğinin yeterli olmadığı durumlarda ara yüzeydeki bağlanmanın zayıf kalması sıkça karşılaşılan problemlerdir. Ayrıca ergiyik yöntemle üretilen kompozit malzemelerden parça imalatında talaşlı imalat şeklindeki bitirme işçiliklerinde kesici takım aşınmaları ve gerekli parça yüzey kalitesini elde etmedeki güçlükler bu uygulamanın dezavantajlı yanları olarak sıralanabilir. Toz metalürjisi metodu ile üretimde seri üretim şeklinde kısa sürede çok sayıda parça üretimi, çoğu durumda üretimi hedeflenen parçanın nihai ölçülerinde ve yüzey kalitesinde veya buna çok yakın parça üretimi yapılabilmektedir. Böylece sert ve talaşlı imalatı zor seramik takviye elemanı içeren toz metal parçalar üzerinden talaşlı işleme ile yapılan sonlandırma işçilikleri en aza ineabilmektedir. Üretilen toz metal kompozit parçalarda yüksek yoğunluk ve mukavemet hedeflendiği durumlarda sıcak presleme şeklinde üretim tercih edilebilir. Ancak sıcak presleme ile parça üretimi hızlı ve seri imalatı ortadan kaldıran bir handikapa sahiptir [15-18].

Bu çalışmada değişen molar oranlarda α -Si₃N₄ içeren alüminyum matrisli kompozit üretimi klasik toz metalürjisi üretim aşamaları uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Literatür taramasında alüminyum matrisli partikül takviyeli kompozit üretiminde yoğun olarak SiC, B₄C veya Al₂O₃ gibi karbür yada oksit takviyeli kompozit üretimi üzerine çalışmalar yapıldığı görülmektedir [19-22]. Son yıllarda yapılan çalışmalarda ise birden fazla takviye elemanı içeren hibrit türü kompozit üretimi üzerine yapılan çalışmalarda bir artış görülmekte. Özellikle alüminyum matrisli seramik takviyeli üretilen kompozitlerin tribolojik özelliklerini iyileştirmek için değişen oranlarda grafit kullanıldığı görülmekte [23-26]. Alüminyum matrisli kompozit üretiminde α -Si₃N₄ takviyeli çalışmaların çok az olması SiC veya Al₂O₃' göre maliyetinin yüksek olmasından en önemli sebeptir [27-28]. Pek çok parçanın kullanım yerinde değişik etkenler tesiri altında aşınmasının parçanın kullanım ömrünü azalttığı, çalışma performansını düşürdüğü veya üretimde ürün ve hizmet kalitesini olumsuz etkilediği, bazı hallerde ciddi iş kazalarına sebep olduğu bilinmektedir. Aşınmaya maruz kalan bu tür parçaların aşınmaya karşı dayancını artırmaya yönelik çalışmalar her geçen gün daha da önemli hale gelmektedir. Bu sebeple, metal esaslı parçaların aşınmaya karşı aşınma kayıplarının etkili bir şekilde azaltılması ve kontrolü her zaman istenen bir durumdur [29-30]. Bu çalışmada literatürdeki benzer çalışmalardan farklı olarak ultra düşük partikül boyut aralığında (0,1-0,3 μ m) α -Si₃N₄ takviye elemanı kullanılırken her iki tozun birbiri içerisindeki karışımını daha homojen kılmak ve matrisle seramik partiküllerin bağlanmasını güçlendirmek için karıştırma işlemi çelik bilye içeren yüksek enerjili atritörde gerçekleştirilmiştir.

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR (EXPERIMENTAL STUDY)

Bu çalışmada üretilmek istenen Al metal matrisli ve α -Si₃N₄ parçacık takviyeli toz metal kompozit malzeme için matris malzemesi olarak ECKART Dorn firmasından temin edilen % 97,9 saflıkta ve toz tane boyutu 200 μ m altı ECKA AS 91/S serisi atomize alüminyum tozu kullanılmıştır. Takviye elemanı olarak T&N TECHNOLOGY LTD firmasından temin edilen 0,1-0,3 μ m parçacık boyut aralığında α -Si₃N₄ tozu kullanılmıştır. Ağırlıkça % 5-10 ve 15 oranında α -Si₃N₄ içeren karışım tozların hassas tartımlar sonrası karıştırma işlemi şekil 1'de verilen yüksek enerjili atritörde yapılmıştır. Mekanik olarak tozların karıştırılması süresince alüminyum tozun birbirine kaynak olmasını ve ortamdaki bilye, karıştırıcı kollar ve

atritör tankı yüzeyine sıvanmasını önlemek amacıyla ortama ağırlıkça %1,5 oranında yağlayıcı olarak çinko streat (ZnSt) ilave edilmiştir (Tablo 1).

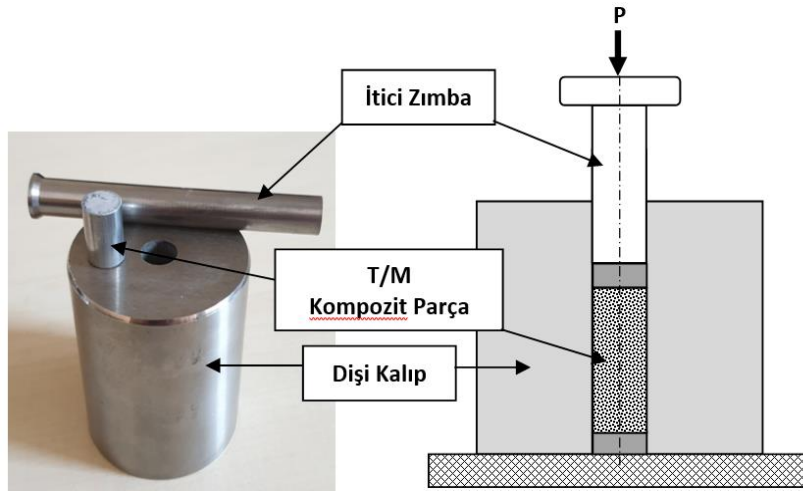


Şekil 1. Yüksek enerjili atritör

Tablo 1. Mekanik karıştırma parametreleri.

Numune	Karışım malzeme	ZnSt. (% ağırlık olarak)	Ağırlık olarak çelik bilye/ Toz oranı	Karıştırma süresi (saat)	Karıştırma atmosferi	Karıştırma (dev/dak.)
1	Al+ % 5 α -Si ₃ N ₄	1,5	10:1	2	Ar	450
2	Al+ % 10 α -Si ₃ N ₄	1,5	10:1	2	Ar	450
3	Al+ % 15 α -Si ₃ N ₄	1,5	10:1	2	Ar	450

Karıştırma sırasında karıştırma ortamına oksitlenmeyi önlemek için koruyucu argon gazı beslenirken uygulamaya bağlı açığa çıkacak ısınmayı önlemek için de sürekli olarak suyla soğutma sağlanmıştır. Karıştırma sonrası elde edilen tozlardan 500 MPa basınç altında tek yönlü aksel kalıpta 10 mm çapta ve 15 mm boyda silindirik blok numuneler preslendi (Şekil 2). Presleme sonrası ham yoğunluk ölçümleri yapılan numuneler atmosfer kontrollü tüp fırında sinterlendi. Numuneler grafit kayık içerisinde tüp fırın merkezine yerleştirildikten sonra fırın sinterleme sıcaklığına (650 °C) kadar 5 °C/dak. hızla yükseltildi ve bu sıcaklıkta 2 saat bekletildi. Sinterleme süresi bitiminde fırın kontrollü olarak oda sıcaklığına soğutuldu.



Şekil 2. Toz metal kompozit numunelerin preslenmesi

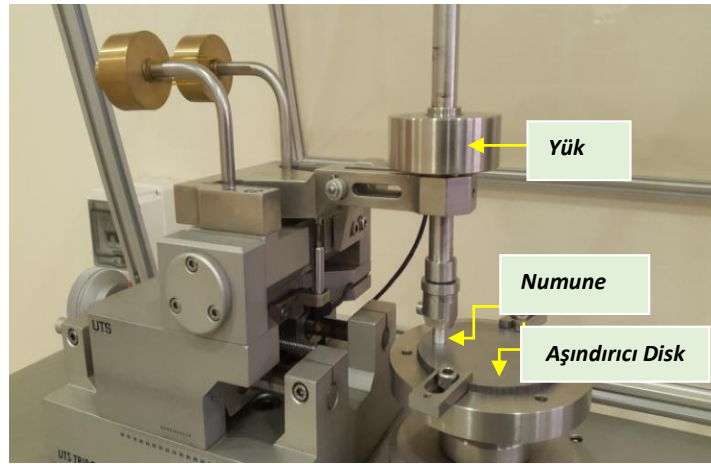
Sinterlenen numunelerin yoğunluk ölçümleri 0,1 mg hassasiyette tartım yapabilmeyen hassas terazide yoğunluk kiti kullanılarak arşiment prensibine göre yapıldı. Numunelerin brinell cinsinden sertlik ölçümleri 31,25 kgf yük altında ve 2,5 mm çapta tungsten karbür standart bilye kullanılarak gerçekleştirildi. Her numune üzerinden 5 farklı ölçüm yapıldı ve ortalaması toz metal kompozit numunelerin sertlik değeri olarak alındı. Metalografik inceleme için sıcak bakalit'e alma işlemi sonrası numune yüzeyleri sırayla 320-1200 µm aralığında SiC zımpara kağıdında zımparalama ve devamında 6-3 ve 1 µm elmas solüsyon kullanılarak parlatılmıştır. Numune yüzeyinden optik ve SEM-EDX görüntüleri alınarak kompozit numuneler sinterleşme ve faz dağılımı bakımından incelenmiştir.

2.1. Aşınma Testi (Wear Test)

Üretilen toz metal parçaların karakterizasyon çalışmaları sonrası farklı oranlarda takviye elemanı içeren kompozit numunelerin **Pin-on-disk** metodu ile kuru kayma aşınma testleri yapıldı. Testler Şekil 3'te verilen **UST TIRIBOMETER T10/20** cihazı kullanılarak yapıldı. Aşındırma test değişkenleri tablo 2' verilmiştir. Aşındırma testi öncesi her numunenin yüzeyleri hassas olarak temizlenmiş ve daha sonra 0,1 mg ölçüm hassasiyetinde hassas terazide ağırlık tartımları yapılmıştır. Aşındırma testi öncesi ve sonrası ölçülen ağırlık değerlerinden hareketle toz metal numunelerdeki aşınmaya bağlı ağırlık kayıpları belirlenmiştir.

Tablo 2. Malzeme ve **pin-on-disk** aşındırma test değişkenleri

Numune	Karışım malzeme	Kayma hızı (m/s)	Kayma mesafesi (m)	Uygulanan yük (N)	Aşındırıcı çelik disk	Aşındırma standardı
1	Al	1,41	2000	5-10-15	Hardox-500 (52 HRC)	ASTM G99-05
2	Al+ % 5 α -Si ₃ N ₄					
3	Al+ % 10 α -Si ₃ N ₄					
4	Al+ % 15 α -Si ₃ N ₄					



Şekil 3. Pin-on-disk aşındırma test cihazı

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSION)

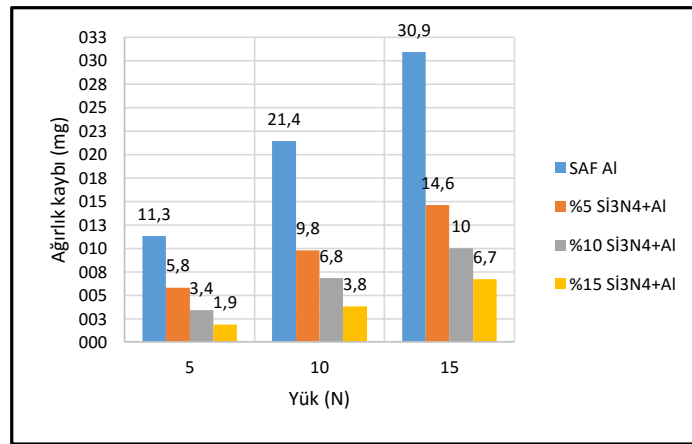
Atritörde karıştırma sonrası % 5 α -Si₃N₄ içeren karışım tozun şeklinde ve ortalama toz tane boyutunda önemli bir değişme görülmezken, % 10 α -Si₃N₄ içeren karışım tozda toz tane boyutu ortalama değeri 42,23 µm' ye kadar düşmüştür. Burada takviye elemanı kompozit tozun sertliğini artırıp, deforme olarak şekil değişimini önemli ölçüde sınırlandırmakta ve kompozit toz partiküllerinde parçalanarak boyutta küçülme daha etkili şekilde ortaya çıkmaktadır. % 15 α -Si₃N₄ içeren karışım tozda ise matris yapıyı oluşturan alüminyum toz partiküllerinin kısmen birbirine kaynaklanarak aglomera olduğu görülmektedir. Bu durum karışım tozun ortalama toz tane boyutunun %10 α -Si₃N₄ içeren karışım toza göre bir miktar artmasına neden olmuştur. Bu durum özellikle ortama yağlayıcı katılmadığı veya yağlayıcının yetersiz kaldığı durumlarda ortaya çıkan bir problemdir [31].

Bütün numunelerde sinterleme öncesi ham yoğunluk değerlerine göre sinterleme sonrası yoğunluk değerlerinin arttığı görülmekte. % 15 α -Si₃N₄ içeren numunede takviye elemanı oranındaki artış kompozitte sinterleşmeyi kısmen engelleyip % 10 α -Si₃N₄ içeren numuneye göre bir miktar yoğunluğun düşmesine sebep olmuştur. Metal matrisli kompozit malzemelerde seramik partikül takviye oranı artarken toz metal blok malzemelerde sinterleşme ve yoğunluk artışı azalmaktadır. Sertlik ölçüm sonuçları matris yapıya göre bütün kompozit numunelerde daha yüksek sertlik değerleri elde edildiğini gösterirken aynı zamanda takviye oranı artışının kompozit malzemelerin sertlik değerlerini de aynı şekilde artırdığını göstermektedir (Tablo 3).

Tablo 3. Numunelerin yoğunluk, sertlik ve ortalama toz parçacık boyutundaki değişim

Karışım toz	Ortalama toz tane boyutu (μ m)	Ham yoğunluk (%)	Sinterleme sonrası yoğunluk (%)	Sertlik (HBw)
Saf Al	104,86	97,6	97,8	46,1
Al+5 % α -Si ₃ N ₄	97,87	91,5	94,5	65,9
Al+10 % α -Si ₃ N ₄	42,23	94	97,1	70,0
Al+15 % α -Si ₃ N ₄	61,02	92	94,6	76,1

Aşınma testleri sonrası numune kompozisyonuna ve uygulanan yüke bağlı ağırlık kayıplarındaki değişim Şekil 4'te görülmekte. 5 N yük altında gerçekleştirilen aşındırma testleri sonrası sırayla matris malzemede 11,3 mg, % 5 α -Si₃N₄ içeren kompozitte 5,8 mg, % 10 α -Si₃N₄ içeren kompozitte 3,4 mg ve % 15 α -Si₃N₄ içeren numunede 1,9 mg ağırlık kaybı olduğu görülmekte. Elde edilen sonuçlar matris malzemeye göre α -Si₃N₄ içeren kompozit malzemelerin aşınma kayıplarında ciddi bir azalma olduğunu göstermektedir. Aşındırmaya bağlı ağırlık kayıplarında matris malzemeye göre sırayla % 5 α -Si₃N₄ içeren kompozitte % 48,67, % 10 α -Si₃N₄ içeren kompozitte % 69,91 ve % 15 α -Si₃N₄ içeren kompozitte % 83,18; nispetinde azalma görülmüştür (Şekil 4). Uygulanan 5 N yük altında ortaya çıkan ağırlık kayıplarına göre takviye elemanı ilavesinin matris malzemenin aşınma direncinde ciddi bir iyileşme sağladığı görülmekte. Takviye elemanı oranı artarken aşınma kayıplarının da hızla düştüğü görülmektedir.



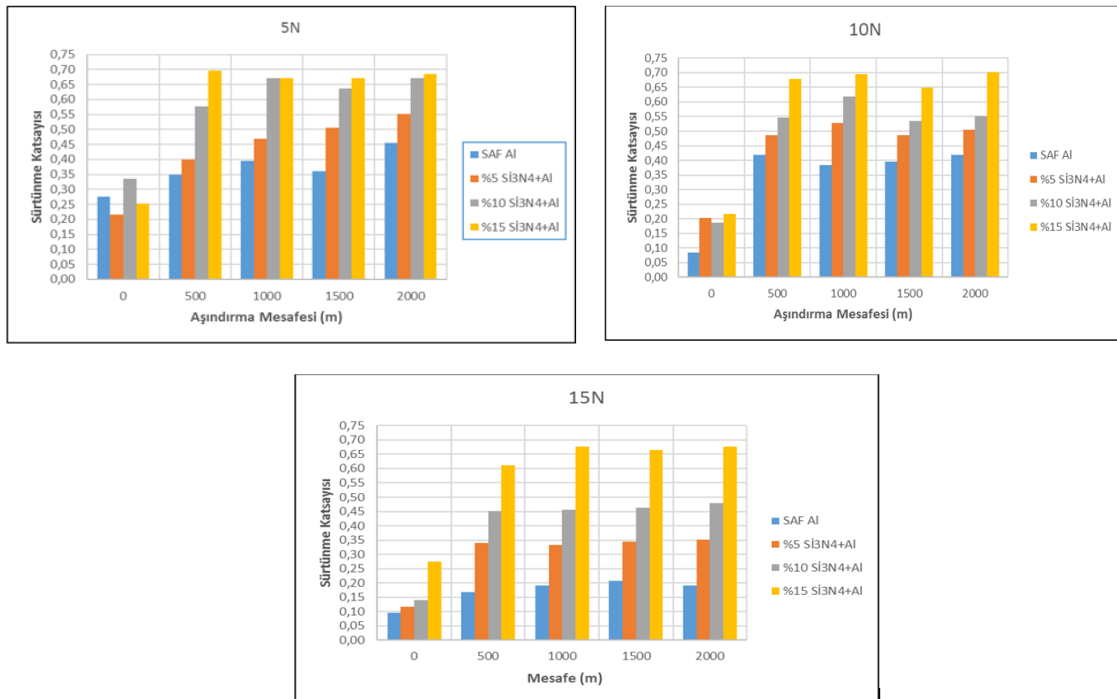
Şekil 4. Yüke ve malzeme kompozisyonuna bağlı aşınma kaybı değerlerindeki değişim

Test sonuçlarına göre uygulanan yük artarken bütün numunelerde aşınma değerleri artmıştır. 5 N yük altında matris malzemede ağırlık kaybı 11,3 mg iken aynı şartlarda 10 N yük altında % 89,38 artarak, 21,4 mg'a, 15 N yük altında % 173,4 artarak 30,9 mg değerine yükselmiştir. Bu sonuçlar literatür taramasında görülen benzer çalışmalarla da uyumludur. Aşınmaya etkiyen diğer parametreler değişmediği sürece uygulanan yük artarken aşınma değerleri artmaktadır [32-34].

Kompozit numunelerde de aynı şekilde yük artışına bağlı aşınma değerleri artmıştır. Örneğin % 15 α -Si₃N₄ içeren kompozitte 5 N yük altında 1,9 mg ağırlık kaybı olurken, 10 N yük altında % 100 artarak 3,8 mg, 15 N yük altında % 252,6 artarak 6,7 mg ağırlık kaybı ortaya çıkmıştır. Elde edilen sonuçlar yük artışına bağlı olarak matris malzemeye göre kompozit malzemelerdeki ağırlık kaybı oranlarının bir miktar yüksek olduğu

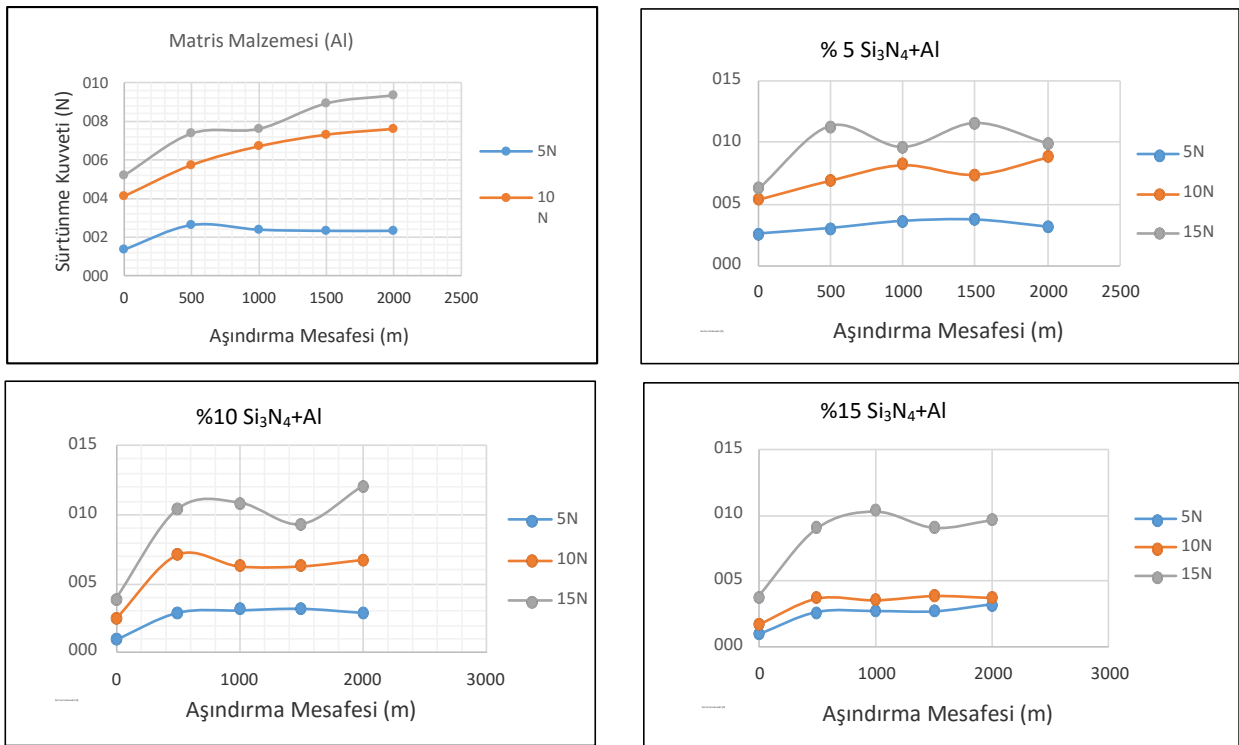
görülmekte. Bunun temel sebebi matris malzemeden üretilen numuneler aşındırılırken karşı aşındırıcı disk yüzeyinde ciddi bir bozulma oluşturmazken, kompozit numunelerde durum farklıdır. Kompozit numuneler kendileri aşınırken içerdiği seramik takviye elemanının tesiriyle karşı disk yüzeyini de çizerek ve yüzey pürüzlülüğünü bozarak çelik diskin aşındırma etkisini artırmaktadır. Numunelerin aynı iz üzerinde dairesel dönme hareketi yaparak aşındığını düşünürsek aşındırıcı yüzeydeki her tür bozulma test numunesinin aşınma değerlerini doğrudan etkilemektedir.

Burada görülen etki aşındırıcı disk yüzeyinin bozulmaya bağlı olarak test numunesini aşındırma etkisinin daha da artmış olacağı şeklindedir. Buna göre mevcut elde edilen aşınma değerlerinin disk yüzeyindeki bozulma ve artan aşındırma etkisinden dolayı olması gerekenden bir miktar daha fazla olduğunu söyleyebiliriz. Yani kompozit malzemeler mevcut disk üzerinde aşındırılırken disk yüzeyinde herhangi bir bozulma olmasaydı kompozit numunelerin matris malzemeye göre aşınma kaybı değerleri çok daha düşük olacaktı. Seramik parçacık takviyeli kompozit malzemelerin pin-on-disk metodu ile çelik disk üzerinde aşınma testlerinde pratik olarak bu olumsuzluğu ortadan kaldırmak kolay değildir. Bu çalışmada olduğu gibi takviye elemanı partikül boyutu ne kadar küçük olursa aşındırıcı karşı diskin aşındırılan numuneden etkilemesi o derece düşük olacaktır. Seramik partikül boyutu büyük olan kompozit malzemelerde seramik parçacıkların çizerek çelik diski aşındırma etkisi daha yüksek olacaktır. Aşındırılan numunelerin α - Si_3N_4 içeriğine ve uygulanan yüke bağlı olarak belirli mesafelerdeki (500-1000-1500-2000 m) sürtünme katsayısı değerleri incelendiğinde genel olarak matris malzemeye göre kompozit malzemedeki sürtünme katsayısı değerlerinin arttığı görülmektedir. Örneğin 5 N yük altında 500 m mesafede sürtünme katsayısı matris malzemesi için 0,34, % 5 α - Si_3N_4 içeren kompozitte 0,40, % 10 α - Si_3N_4 içeren kompozitte 0,57 ve % 15 α - Si_3N_4 içeren kompozitte 0,70 olarak ölçülmüştür. Sonuçlar takviye elemanı oranı artarken sürtünme katsayısının da arttığını göstermektedir [35]. Genel olarak yük artışına bağlı olarak sürtünme katsayısı değerlerinde ciddi bir değişim görülmemektedir. Bütün kompozit numuneler için sürtünme katsayısı değerleri 0,20 ile 0,70 arası değişim göstermektedir (Şekil 5). Mesafe artarken aşınma katsayısı değerlerinde küçüğe olsa artma görülürken zaman zaman tersi sonuçlarda ortaya çıkmıştır. Aşındırılan malzemenin toz metal parça olması sinterleşme ve takviye elemanı partiküllerin matris yapı içerisindeki dağılımında yer yer görülen farklılıklardan dolayı farklı sonuçların ortaya çıkması beklenebilir. Genel olarak matris malzemeye göre kompozit malzemelerde sürtünme katsayısı değerinin takviye oranı artışına paralel olarak artıyor olması disk yüzeyindeki bozulmaya bağlı olarak ortaya çıkmaktadır.



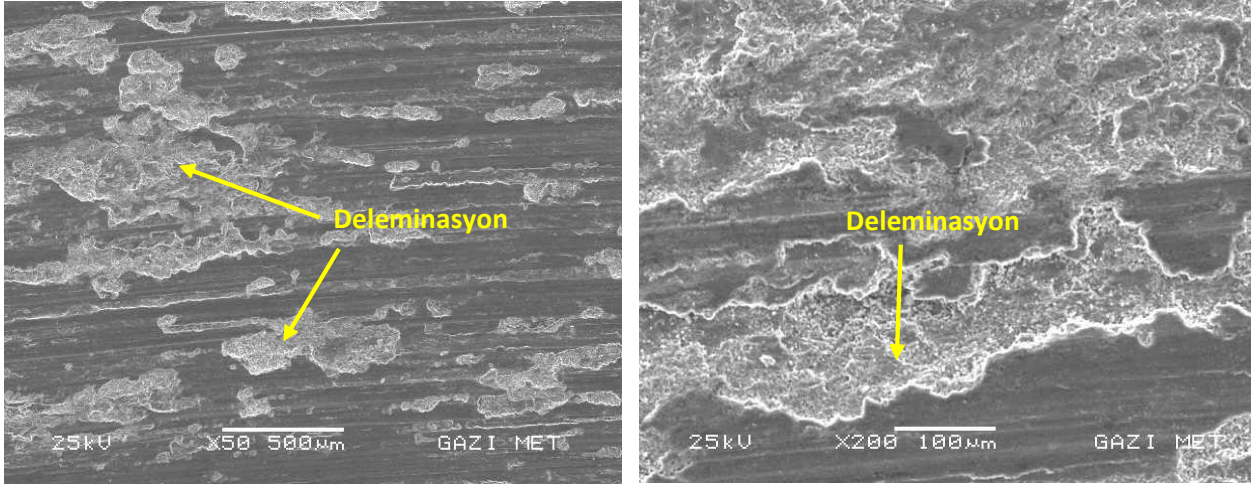
Şekil 5. Değişen yükler altında malzeme kompozisyonuna ve aşındırma mesafesine bağlı sürtünme katsayısındaki değişim

Matris malzemesi ve değişen oranlarda α -Si₃N₄ takviye elemanı içeren kompozit toz metal numuneler için değişen yükler altında ve belirli aşındırma mesafelerindeki sürtünme kuvveti değerleri şekil 6'de verilmektedir. Matris malzeme üzerinden alınan değerler uygulanan yük artışına paralel olarak sürtünme kuvveti değerlerinin arttığını göstermekte. Sürtünme mesafesi artarken bütün yüklerde sürtünme kuvvetlerinin bir miktar arttığı görülmekte bunun nedeni sürtünmeye bağlı aşındırıcı çelik yüzeyin ve aşınan numunenin yüzey kalitesinin bozulmasından kaynaklandığı söylenebilir. Kompozit numunelerde de benzer şekilde yükteki artışa paralel sürtünme kuvvetlerinin arttığı görülürken, bütün kompozit numunelerde aşındırma mesafesi artarken kısmi artış görülmektedir. Numunelerdeki takviye oranı artarken kısmen sürtünme kuvvetlerinde bir düşüş görülsede bu durum bütün yükler ve mesafeler için çok uyumlu görünmemektedir. Bunun sebebi çok dar aralıklardan cihaz veri kaydederken malzemenin kompozit ve toz metal parça olmasından kaynaklı olarak alınan verilerde hem sürtünme katsayısı değerlerinde hem de sürtünme kuvveti değerlerinde ciddi dalgalanmalar olmasındandır.

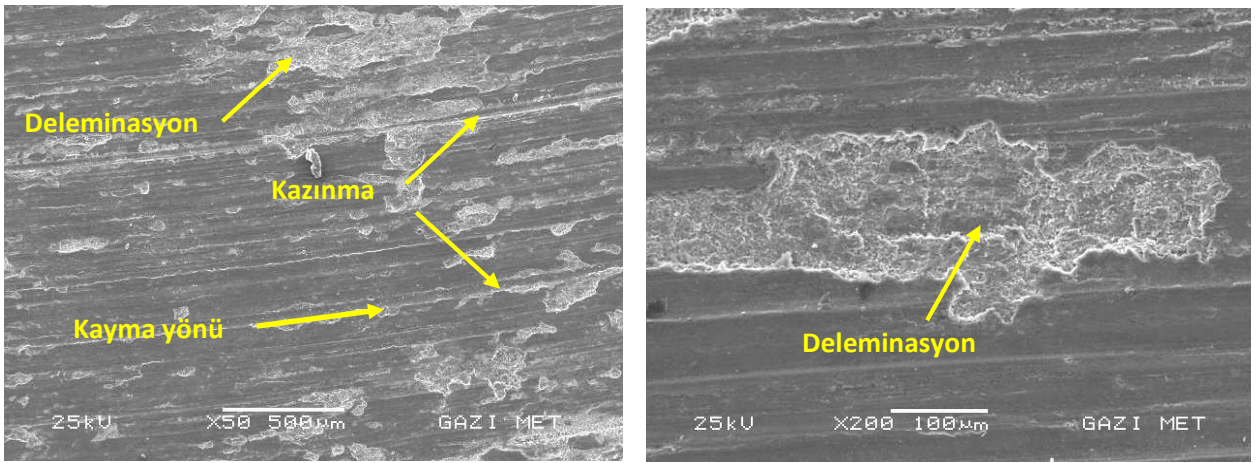


Şekil 6. Matris ve kompozit malzemelerde değişen yükler ve aşındırma mesafelerine bağlı sürtünme kuvvetlerindeki değişim.

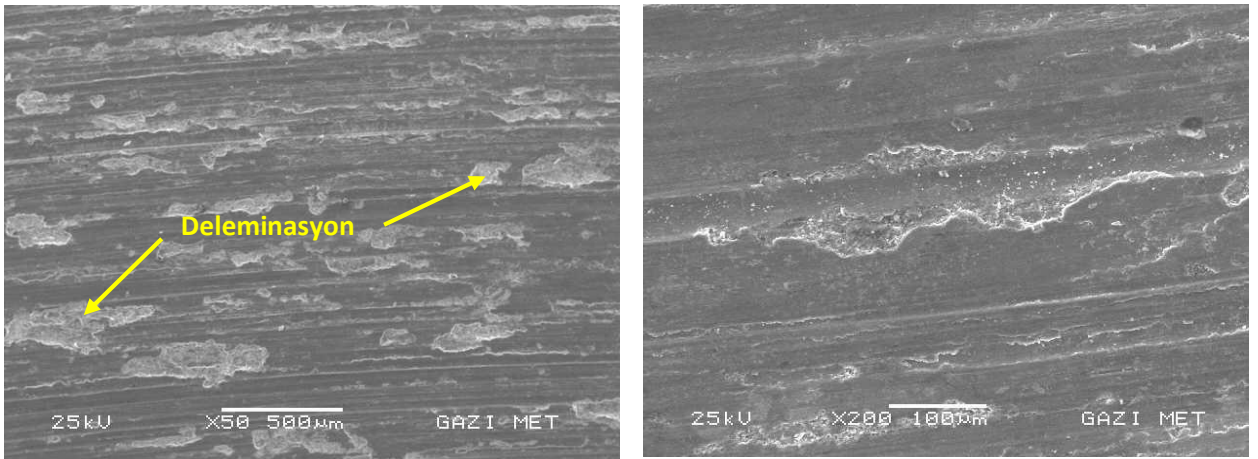
20 N yük altında yapılan aşındırma testleri sonrası numune yüzeylerinden alınan SEM görüntüleri bütün numunelerde yoğun şekilde delemantasyon türü aşınma mekanizmasının gerçekleştiğini göstermektedir. Bu tür yüzeyden aşınarak kopan kitlenin takviye elemanının kompozit içerisindeki oranı artarken azalma eğilimine girdiği görülmekte (Şekil 7-9). Elde edilen görüntüler aşınmaya bağlı ortaya çıkan ağırlık kaybı değerleriyle de uyumludur. Aşınan yüzeylerde yer yer kazınma şeklinde abrasiv aşınma mekanizmasının da meydana geldiği bu durum kompozitteki takviye elemanının tesiriyle bozulmuş olan aşındırıcı disk yüzeyinin sebep olduğu şeklinde yorumlanmıştır. % 15 α -Si₃N₄ içeren kompozitte numune yüzeylerinde kazınarak abrasiv aşınmanın ve delemantasyon türü aşınarak kopan parçacıkların boyutunun küçüldüğü görülmektedir (Şekil 9).



Şekil 7. % 5 α -Si₃N₄ içeren kompozit numunenin 20 N yük altında aşınma yüzey desenleri



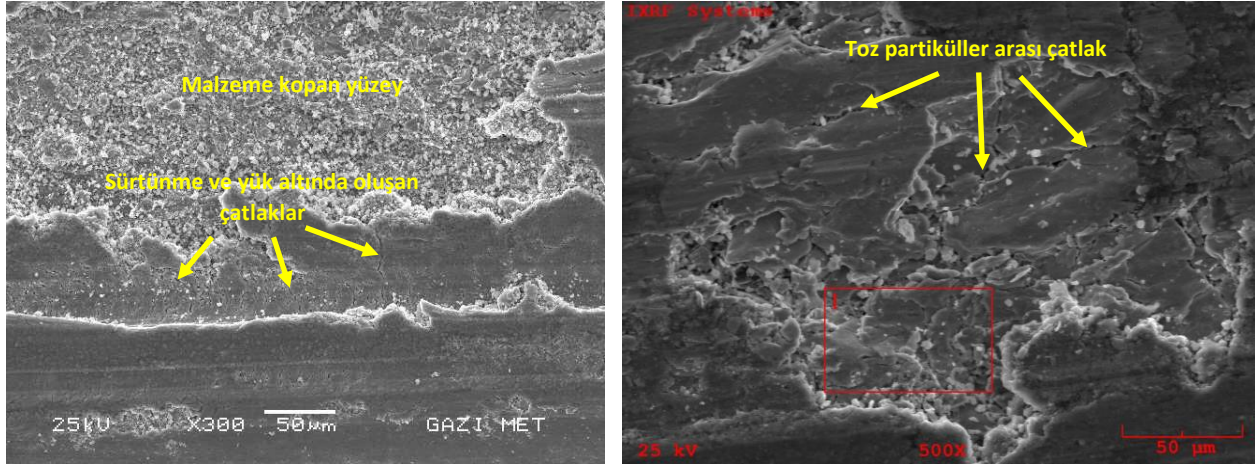
Şekil 8. % 10 α -Si₃N₄ içeren kompozit numunenin 20 N yük altında aşınma yüzey desenleri



Şekil 9. % 15 α -Si₃N₄ içeren kompozit numunenin 20 N yük altında aşınma yüzey desenleri

Aşınma sürecinde sürtünme ve basma kuvvetleri tesiri altında deleminasyon (kavkıma) şeklinde kopan veya kopmaya yakın parçaların tabaka halinde yüzeyden ayrıldığı görülmekte. Bu durumda kompozit toz metal parçanın kendi içerisinde sinterleşme derecesi çok büyük öneme sahiptir. Toz metal parçada yeterince sinterleşme olmadığı veya toz partiküllerin ara yüzeylerinde kalan atık ve gözenekler çatlak oluşumuna ve büyümesine sebep olabilir. Aşınmaya maruz kalacak parçalarda bu tip sorunları aşabilmek için yüksek yoğunluk ve sinterleşme ile bağlanmayı mümkün kılan sıcak presleme ile parça üretimi tercih edilebilir. Literatür taramasında karşılaşılan sıvı metal yöntemiyle üretilen benzer kompozisyonda toz metal kompozit

malzeme üretiminde kısmen daha yüksek yoğunluk ve mukavemet değerleri elde edildiği görülmektedir [36-37] . Şekil 10’da aşınmaya bağlı numune yüzeyinden malzeme kopmuş bir yüzey ve kenar bölgelerden kopmaya yakın parçalar ve buna sebep olan çatlak oluşumu görülmektedir.



Şekil 10. % 5 α -Si₃N₄ içeren kompozit numunenin 20 N yük altında aşınan yüzeyinde deleminasyon türü aşınma

Yüzeyden kopan kompozit parçanın oluşturduğu boşluktan alınan SEM görüntüleri kompozit yapıdaki toz partiküllerin birbirlerine sinterlenerek bağlanmalarının kritik öneme sahip olduğunu göstermektedir. Kopan parçanın gerisinde kalan ve aşındırıcı diskle teması kesilen bölgeden alınan SEM-EDX analiz sonuçları kompozit malzemenin içerdiği takviye elemanlarının tesiri altında aşındırıcı diskin çizilmesi sonucu açığa çıkan atıkların kompozit yüzeyini ciddi olarak kirlettiği görülmektedir. Bu bölgeden alınan analiz sonucu kompozit malzeme kompozisyonunda olmayan demiri % 81,14 mertebesinde göstermektedir (Şekil 10).

Genel sonuçlar (General results)

1. Toz metalurjisi metodu ile değişen molar oranlarında α -Si₃N₄ içeren alüminyum matrisli toz metal kompozit malzemeler başarıyla üretilmiştir.
2. Matris malzemeye göre kompozit malzemelerde % 65' kadar sertlik artışı sağlanmıştır.
3. Aynı şartlarda üretilen matris malzemeye göre kompozit malzemelerin tümünde aşınma davranışında iyileşmeler görülürken, en yüksek aşınma dayancı % 15 α -Si₃N₄ içeren numunede ortaya çıkmıştır.
4. Aşınan numune yüzeylerinden alınan SEM-EDX görüntü ve sonuçları numunelerde deleminasyon tipi aşınma mekanizmasının yoğun olarak ortaya çıktığını göstermektedir.
5. Kompozit numunelerin aşındırılmasında aşındırıcı disk yüzeyi kompozitteki takviye elemanı tarafından çizilerek abrasiv aşınma meydana geldiği bunun sonucu olarak aşınan kompozit numune yüzeylerini kısmen abrasiv aşınma gerçekleştiği görülmekte.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Rosso M. 2006, Ceramic and metal matrix composites: Routes and properties. Journal of Materials Processing Technology, 175 (364-375), (2006).
- [2] Sahu P.S., Banchhor R. Effect of different reinforcement on mechanical properties of aluminium metal matrix composites, Res. J. Engineering Sci., 6 (39-45), (2017).
- [3] Matli M.R., Matli R.R et all. Structural and mechanical properties of amorphous Si₃N₄ nanoparticles reinforced Al matrix composites prepared by microwave sintering. Ceramics, 2 (126-134), (2019).
- [4] Mahajan G.V., Aher V.S. Composite material: A review over current development and automotive application, International Journal of Scientific and Research Publications, 2 (1-5), (2012).

- [5] Babalola P.O., Bolu C.A., et al. Development of aluminium matrix composites: A review, *Journal of Engineering and Technology Research*, 1(1-11), (2014).
- [6] Ervina Efan M.N., Siti Syazwani N., and Abdullah M.M.A.B. Fabrication method of aluminum matrix composite (Amcs): A review, *Key Engineering Materials*, 700(02-110), (2016).
- [7] Ramnath B.V., Elanchezian C. Aluminium metal matrix composites - A review, *Advanced Materials Science*, 38(55-60), (2014).
- [8] Manohar G., Dey A., Pandey K.M. and Maity S.R. Fabrication of metal matrix composites by powder metallurgy: A review, *International Conference on Electrical, Electronics, Materials and Applied Science*, 020041(1-8), (2019).
- [9] Thirumoorthy A, Arjunan T.V., Senthil Kumar K.L. Latest research development in aluminum matrix with particulate reinforcement composites – A review, *Materials Today: Proceedings* 5(1657–1665), (2018).
- [10] Attar S., Nagaral M., et al. A review on particulate reinforced aluminum metal matrix composites, *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research*, 2(225-229), (2015).
- [11] Bedir F. Characteristic properties of Al-Cu-SiCp and Al-Cu-B₄Cp composites produced by hot pressing method under nitrogen atmosphere, *Materials and Design*, 28(1238-1244), (2007).
- [12] Kırmızı G., Arık H., Çinici H. Experimental study on mechanical and ballistic behaviours of silicon carbide reinforced functionally graded aluminum foam composites. *Composites Part B*, 164(345-357), (2019).
- [13] O'Donnell G., Looney L. Production of aluminium matrix composite components using conventional PM technology, *Materials Science and Engineering A*. 303(292-301), (2001).
- [14] Kaczmar J.W., Pietrzak K., Włosinski W. The production and application of metal matrix composite materials. *Journal of Materials Processing Technology*, 106(58-67), (2000).
- [15] Mahdavi S., Akhlaghi FR. Effect of the SiC particle size on the dry sliding wear behavior of sic and sic-gr-reinforced Al6061 composites, *J Mater Sci*, 46(7883-7894), (2011).
- [16] Sureshkumar P., Uvaraja V. Effect of ceramic and metallic reinforcement on mechanical, corrosion, and tribological behavior of aluminum composite by adopting design of experiment through taguchi technique. *Journal of Tribology*, 140(1-11), (2018).
- [17] Kumar M., Gupta R.K., Pandey A. A review on fabrication and characteristics of metal matrix composites fabricated by stir casting. *Conference Series: Materials Science and Engineering*, 377(1-9), (2018).
- [18] Saravanan R., Vinod K., Tamilarasan T. Investigation of wear behaviour of al 6061 alloy reinforced with sic, Al₂O₃ and e glass fiber. *International Journal of Scientific Engineering and Applied Science (IJSEAS)*, 1(430-434), (2015).
- [19] Imran M., Anwar Khan A.R. Characterization of Al-7075 metal matrix composites: A review. *J. Materials Research and Technology*, 8(3347–3356), (2019).
- [20] Ramesh B.T. Characterization of Al based nano composites using powder metallurgy technique. *International Journal of Research In Aeronautical and Mechanical Engineering*, 2(131-147), (2014).
- [21] William C., Harrigan Jr. Commercial processing of metal matrix composites. *Materials Science and Engineering A*, 244(75-79), (1998).

- [22] Ambigai R., Prabhu S. Optimization of friction and wear behaviour of Al-Si₃N₄ nano composite and Al-Gr-Si₃N₄ hybrid composite under dry sliding conditions. *Trans. Nonferrous Met*, 27(986-997), (2017).
- [23] Ul Haq M.I., Anand A. Dry sliding friction and wear behaviour of hybrid AA7075/Si₃N₄/Gr self lubricating composites. *Mater. Res. Express*, 5(1-12), (2018).
- [24] Sharma P., Sharma S., and Khanduja D. Production and characterization of AA6082-(Si₃N₄+Gr) stir cast hybrid composites. *Particulate Science and Technology*, 35(158-165), (2017).
- [25] Monikandan V.V., Joseph M.A., Rajendrakumar P.K. Dry sliding wear studies of aluminum matrix hybrid composites. *Resource-Efficient Technologies*, 2(12-24), (2016).
- [26] Ambigai R., Prabhu S. Fuzzy logic algorithm based optimization of the tribological behavior of Al-Gr-Si₃N₄ hybrid composite. *Measurement*, 146(736-748), (2019).
- [27] Tyagi A., Sharma D. Characterization of AA6082/Si₃N₄ composites, 1st International conference on new frontiers in engineering. *Science & Technology*, New Delhi, India, January 8-12, (2018).
- [28] Sharma P., Sharma S., Khanduja D. Production and some properties of Si₃N₄ reinforced aluminium alloy composites. *Journal of Asian Ceramic Societies*, 3(352-359), (2015).
- [29] Arik H., Semerci P., Kırmızı G. Sıcak presleme ile alüminyum matrisli ve Al₂O₃ takviyeli toz metal kompozit malzeme üretimi ve aşınma davranışının araştırılması. *GU J Sci, Part C*, 5(87-97), (2017).
- [30] Arik H., Orhun D.Z., Investigation of dry sliding wear behavior of powder metal (p/m) materials produced from mixture of Fe-Cu-C powders. *GU J Sci, Part A*, 5 (37-48), (2018).
- [31] Arik H. Effect of mechanical alloying process on mechanical properties of α -Si₃N₄ reinforced aluminum-based composite materials. *Materials & Design*, 29(1865-1861), (2008).
- [32] Ramesh B. T., Arun Kumar M. B., Swamy R.P. Dry sliding wear test conducted on pin-on-disk testing setup for al6061-sic metal matrix composites fabricated by powder metallurgy. *International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology*, 2(264-270), (2015).
- [33] Lawrence O.O., Oluwaseyi O. T., and Samson O. A. The dry sliding wear behaviour of aluminum composites: A review. *The West Indian Journal of Engineering*, 40(17-23), (2017).
- [34] Veeresh Kumar G.B., Rao C.S.P., Selvaraj N. Studies on mechanical and dry sliding wear of Al6061-Sic composites. *Composites: Part B*, 43(1185-1191), (2012).
- [35] Rao R.N., Das S. Effect of matrix alloy and influence of sic particle on the sliding wear characteristics of aluminium alloy composites. *Materials and Design*, 31(1200-1207), (2010).
- [36] Ul Haq M.I., Anand A. Dry sliding friction and wear behavior of AA7075-Si₃N₄ composite. *Silicon*, 10(1819-1829), (2018).
- [37] Radhika N., Raghu R. Parametric study of dry sliding wear behaviour of functionally graded Al LM25/Si₃N₄ composite by response surface methodology. *Advanced Composites Letter*, 24(130-136), (2015).

Fatigue Life Evaluation of a Leaf Spring by FEA Using Rough Road Data

 Arif Şenol ŞENER^{1,*} , Yunus MARAL² 
¹ Nişantaşı University Faculty of Engineering and Architecture, Department of Mechanical Engineering, 34800, Maslak /ISTANBUL

²Pracen Co. ULUTEK Görükle, Üniversite Mah. -1 Sok.No:933/B013Nilüfer, Görükle/BURSA

Graphical/Tabular Abstract

Article Info:

Research article
 Received: 22/07/2019
 Revision: 19/09/2019
 Accepted: 06/10/2019

Highlights

- Worst Case.
- Leaf Spring.
- Fatigue Life

Keywords

Road Data
 Characteristics,
 Rope potentiometer,
 Worst case,
 FEA,
 Fatigue,
 Miner rule

In this study, fatigue analysis of a rear leaf spring, which is widely used in commercial vehicles, was investigated. Fatigue simulations are four types, such as four-poster, road test simulation, bench test and computer aided analysis. With FEA, the shape changes of leaf spring structure in linear and nonlinear methods were investigated. For the light commercial vehicle, the heaviest road track data within the newly designed reliability and fatigue routes was extrapolated to 200.000 km and leaf spring was applied as external load. Fatigue analysis of leaf spring was performed.



Figure A. 3D model of the leaf spring

Purpose: In this study, the heaviest road profile of the reliability test trucks determined by the equipped test vehicle at Standard -C load condition very close to the factory. The analysis and evaluation of the data of a rope potentiometer measuring leaf spring movements were performed. The results of the leaf spring factory entrance acceptance tests were performed by linear and non-linear finite element method, and the convergence of computer simulation was determined. Fatigue life analysis according to finite element method of leaf spring was made by reference to Miner rule.

Theory and Methods: Based on the S-N method and taking into account the largest prime stress, according to the Von-Misses method, the data of the heaviest test track was extrapolated to 200,000 km and the fatigue Miner rule was applied.

Results: According to S-N method, when the most critical level of leaf spring life is repeated 156.6 times 200.000 km, breakage has started and hence, even in the worst case, leaf spring has a very endless life.

Conclusion: 3D design of rear leaf spring of the light commercial vehicle was realized. Reliability and fatigue test trucks were determined and the heaviest track was stated according to missions. Linear and nonlinear collapse test simulation were executed referencing collapse test. Hexagon type 3D element used for meshing the leaf spring due to gives the more precise results, so it is generally meshed with hexagon type element except for critical places. After applying the heaviest load data on the fatigue track, it was confirmed that there was no fatigue damage at the projected 200,000 km in the rear leaf spring.



Bozuk Yol Verileri Kullanarak Bir Yaprak Yayın Yorulma Ömrünün SEA ile Değerlendirilmesi

Arif Şenol ŞENER^{1,*} , Yunus MARAL² 

¹Nişantaşı Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 34000, Maslak /İSTANBUL

²Pracen A.Ş. ULUTEK Görükle Mah. Üniversite Mah. -1 Sok. No: 933 / B013 Nilüfer, Görükle /BURSA

Öz

Araçlardaki yorulma kaynaklı hataları genelde uzun zamanda yani yüksek km'ler de ortaya çıkan, hem müşteri hem de üretici firmanın karşılaşmak istemediği ciddi bir kalite hatasıdır. Bu makale de hafif bir ticari oto için üretici firma yakınlarında oluşturulmuş olan güvenilirlik ve yorulma testleri parkurlarından en ağır olanının yol profil karakteristiği ipli bir potansiyometre ile ölçümü ve kullanılabilir hale getirilmesi için veri işleme yapılmıştır. Ardından sol arka yaprak yayının bilgisayar programı ile modellenmesi, meshlenmesi, statik analizleri ile yorulma analizinin Sonlu Elemanlar Analizi yöntemi vasıtasıyla hesaplanması yapılarak bu yaprak yayın yorulma hayatının değerlendirilmesi yapılmıştır.

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
 Başvuru: 22/07/2019
 Düzeltme: 19/09/2019
 Kabul: 06/10/2019

Anahtar Kelimeler

Yol Karakteristik Verisi,
İpli potansiyometre,
En Kötü Durum,
SEA,
Yorulma,
Miner kuralı

Keywords

Road Data
Characteristics,
Rope potentiometer,
Worst case,
FEA,
Fatigue,
Miner rule

Fatigue Life Evaluation of a Leaf Spring by FEA Using Rough Road Data

Abstract

Fatigue-related faults in vehicles usually occur over a long period of time, ie; high km, both the customer and the manufacturer does not want to encounter is a serious quality error. In this article, data processing has been carried out to measure and make available the heaviest of the reliability and fatigue test tracks that have been established in the vicinity of the manufacturer for a light commercial car with a rope potentiometer. Then, the computerized modeling, meshing, static analysis and fatigue analysis of the left posterior leaf spring were calculated by Finite Element Analysis method and the fatigue life of this leaf spring was evaluated.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde otomobil firmaları kalite yönünden rakipleriyle rekabet halinde iken aynı şekilde ağırlık ve maliyet azaltma gibi iki önemli hedefi de inovatif ve akılcı çözümlerle kısa zamanda sürdürmek zorundadır. Araç parçalarındaki yorulma; yol profili düzensizliklerden ve araç direksiyonlama vb hareketlerinden dolayı ortaya çıkan kalite hatalarından biri olup uzun km'lerde veya uzun sürede oluşması nedeniyle kritiktir[1-3].

Yorulma hatasını etkileyen en önemli parametreler geometri, çalışma koşulları, dış yükün büyüklüğü ve tekrarıdır. Bu parametrelerden en kritiği olan dış yükün tespit edilmesi çok önemlidir[4]. Yorulma hatalarının tarihçesine bakıldığında; 1940 yıllarında yolların gelişmesi ve müşterilerin çok km yapmaları üretici firmaları yorulma hatalarıyla karşılaşmalarına ve bu hatayı gidermek için çeşitli simülasyon testleriyle dış yükün tespit ile ilgili uygulamalar yapılmıştır.

Bunlar;

- Tahminlerden(Guesswork)
- En kötü durumlardan(Worst Casing)
- Daha önceki tecrübe edilmiş deneyimlerden (Established Practice)
- Temel yol yükleme verilerinden (Basic Road Load Data)
- Yasalardan(Legislature)
- Müşteri profiline göre (Mission Profile)[5].

Bu çalışmalardan en popüler ve modern olanı müşteri profilini esas alan çalışmadır. Bu çalışmalara örnek olarak ıslak ve kuru yer şartlarında traktör kullanımı ve tarımla ilgili olduğu kadar traktörün tarımla ilgili olmayan kullanım şartlarını içeren bir çalışma Hindistan'da ETEC (Eicher Tractors Engineering Centre) and ARIA (Automotive Research Association of India tarafından yapılmıştır [5]. Bir diğer çalışma FIAT şirketi tarafından Brezilya ve İtalya pazarını içeren bir çalışma yapılmıştır. Bu çalışmada Brezilya sürücü davranışlarını ve Brezilya yollarından toplanan yol karakteristiklerinin İtalya özel test parkuru ve cihazlarında mukayeselerini frekans bazlı yorulma olarak yapılmıştır [6]. Diğer bir çalışma FIAT şirketi AMOA (automobile mode of operation systems) Ritmo 60 ve Tipo1372 DGT üzerinde müşteri korelasyonu ile ilgili bir çalışma yapmıştır [7-9].

Yaprak yay ile benzer çalışmalardan biri E-N birim uzama bazlı yorulma metoduna göre bir otobüsün çift yapraklı yayınının strain-gauge'lerle 3 farklı yol tipinde ölçümü yapılarak yaprak yay yorulma etkilerini sonlu elemanlar modeli ile hesaplanıp mukayeseleri yapılmıştır[10].

Diğer bir çalışmada S-N yüksek çevrimli yorulma metoduna göre, iki grup yatay ve dikey haddeme sonucu 51CrV yaprak yay malzemesi ile üretilen ve ayrıca farklı temperleme sıcaklıklarında uygulamaları ile elde edilmiş olan yaprak yayların yorulma analiz sonuçları incelenmiştir[11]. Bir başka çalışma birden çok kamyonun yalnızca bozuk yol profilinden 3 farklı hızda veriler alınarak bir yük spekturumu oluşturulup hem SEM (sonlu elemanlar metodu) ile analiz ve hem de 5 eksenli bir test bankosuyla yaprak yay yorulma dayanımı incelemiştir[12]. Başka bir çalışmada dört yapraklı çelik bir yayın laboratuvar ve SEM kullanarak ANSYS ile yaprak yayda statik analiz sonuçlarında elde edilen veriler temel alınarak bir fiberglastan yapılmış yaprak yayın ANSYS programı ile elde edilmiştir. Bu çalışmada kompozit yayın metal yay göre ağırlığı % 80 azalmış olup yayın hiperbolikliği azalırken yay burçlarından aks bağlantı noktasına doğru yay kesitinin arttığı gözlemlenmiştir[13].

Süspansiyon sistemi, araç şasesi ve tekerlekler arasında yer alan ve yay, amortisör, burç, çubuk, bağlantı ve kollardan oluşan bir sistemdir. Süspansiyon sistemi gövdeyi akslar üzerinde tutan elemandır. Gerek araç dinamiğinden kaynaklanan gerekse yoldaki düzgünsüzlüklerden meydana gelen hareketleri sönmüleyen süspansiyon sistemi ayrıca aracın hayati önemi taşıyan malzeme listesinde yer almaktadır.

Bu çalışmanın diğer çalışmalardan farkı; üretici firmanın bulunduğu Bursa ilinde yol pürüzlülük seviyesi; çukur, tümsek ve toprak yoldan oluşan, en ağır olarak tespit edilen bir gerçek yol verisi kullanılmış olup ölçümler diğer çalışmalarda olduğu gibi kısmi olarak alınmamış, yolun tamamı ölçülerek yapılmıştır. Diğer çalışmalarda bakıldığında yorulma parkurları genelde özel yorulma ve NVH test parkurlarınının bir kısmı karışımı olarak alınıp oluşturulmuştur.

Bu makalede; hafif bir ticari oto (HTA)için üretici firma yakınlarında oluşturulmuş olan güvenilirlik ve yorulma testleri parkurlarından en ağır olanının yol profil karakteristiği, arka süspansiyon yol pürüzlülük değerinin ölçümünün bir ipli potansiyometre ile ölçümünü, daha sonra bu verilerin işlenerek test yükünün belirlenmesini, ardından arka süspansiyon yaprak yayının Solidworks tabanlı bilgisayar programı ile modellenmesini, Ansys programı ile yaprak yayın meshlenmesini, sınır koşullarının belirlenmesini ve statik analizlerinin ilgili firma giriş kalite kontrol yaprak yay çökme testine göre mukayeselerini ve yorulma analizinin SEA yöntemi vasıtasıyla hesaplanmasını ve yaprak yayın yorulma hayatının değerlendirilmesini içermektedir[4-5,7-9,14].

2. UYGULAMA (IMPLEMENTATION)

2.1. Test Aracının Teknik Özellikleri ve Veri toplama Karakteristikleri(Technical Characteristics of the Test Vehicle and Data Acquisition)

Bir taşıtın servis hayatında, taşıt bileşenleri çoğu zaman değişken yüklere maruz kalır. Yol pürüzlülüğü, manevralar, frenleme, direksiyon, güç üreten motor ve şanzımanlama hareketleri bir bileşen üzerine etki eder ya da daha az tamamlanmış elastik sistemler, zamanla-hareket eden işletim yükleri, taşıt parçalarının doğal modlarını tetikleyebilir. Genelde dış yükleri doğrudan gözlemlemek zordur: Genellikle, sadece yapının belirli bir noktasındaki tepkileri ölçülür[4,14]. Tablo 1’de test aracının teknik özellikleri verilmiştir.

Tablo 1. Test aracının teknik özellikleri

<i>Parametre</i>	<i>Değeri</i>
<i>Ara. Tipi</i>	<i>5.173.500</i>
<i>Şasi no</i>	<i>2119394</i>
<i>Motor no</i>	<i>1.9 Dizel</i>
<i>Motor tipi</i>	<i>160 km/h</i>
<i>Maksimum hız</i>	<i>Pirelli P 3000 175/70 R14'' 88T</i>
<i>Tekerlek tipi</i>	<i>1 şoför+4 kişi+100 kg bagaj =1750 kg</i>
<i>Araç Yük kapasitesi</i>	<i>430.8 kg</i>
<i>Ön sol teker</i>	<i>413.7 kg</i>
<i>Arka sol teker</i>	<i>413.7 kg</i>
<i>Ön sağ teker</i>	<i>456.2 kg</i>
<i>Arka sağ teker</i>	<i>413.1 kg</i>

Bu çalışmada test aracı toplam ağırlığı 1720 kg olup aracın Standart C tam yüklü ağırlığına (1750 kg) a çok yakındır. Test Standart-C koşullarında olmak üzere, bir şoför, bir mühendis ve cihazlarla birlikte ilave yüklerle araç Standart-C tam yük koşullarında test edilmiştir. Araç sürat hızı 45-50 km arasındır. Test yapılan bozuk yol 20 km gidiş olarak veri toplanmış olup çukur ve tümseklerden oluşan toprak bir yoldur. Çukurların derinliği yaklaşık olarak 5-12 cm arasında olup bunu tamamlayan tümsekli bir yoldan oluşmaktadır. Araç hızı 45-60 km/h hız aralığında olup çok sayıda ardı ardına çukur ve tümseklerden oluşmasından dolayı daha üst bir hıza çıkılamamıştır.



Şekil 1. Sağ arka yaprak yay ve ipli potansiyometre montaj yapılmış resmi

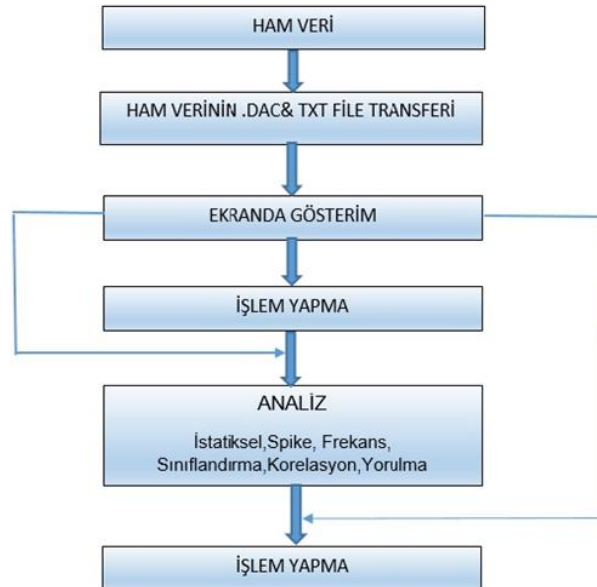
Veriler tek gidiş yönünde Geçit köyü ile Bursa-Karacabey bağlantı yolun kadar ölçülmüştür. Bu çalışmada yol pürüzlülüğü ve manevralardan dolayı arka süspansiyonda düşey yönde oluşacak reaksiyon hareketlerinin ölçülmesi amacıyla Şekil 1 de görüldüğü gibi 0-30 cm arasında çalışan 10 Vdc beslemeli, ipli bir potansiyometre kullanılmıştır. Veriler 400 Hz sampling rate oranında kaydedilmiştir[14]. Bu çalışmada hafif bir ticari otonun fabrika civarı yorulma parkurlarını oluşturmak amacıyla Bursa civarı şehir içi, şehir dışı, dağ-tepe yol ve bozuk parkurlardan veri toplanmıştır. Bazı kullanılan yollar, karakteristikleri ölçüldükten sonra yol testlerinde iptal edilmiş, bazı yeni yollar eklenmiştir. Bu makalede bu yolar arasında süspansiyona yorulma etkisi en fazla olan; çukur ve tümseklerden oluşan Bursa'daki bir toprak ağır test yolunun etkilerinin incelenmesi yapılmıştır. Şekil 2 de Bursa ilinde alınan ağır test yol parkurunun dikey yol etkilerinin ölçüldüğü sağ arka yaprak yaydan ipli potansiyometre ile alınan 20 km lik yol sinyali görülmektedir.



Şekil 2. Ağır test parkurunda ölçülen sağ arka yaprak yay süspansiyon hareketlerinin dikey yöndeki yük –zaman grafiği

2.2 Veri İşleme(Data Elaboration)

Bu çalışmada kullanılan veri analizi yöntemi Şekil 3'de gösterilmiştir. Toplanan sinyaller spike analizi, filtreleme analizi, aritmetik işlemler, frekans analizi vb. işlemler nCode Design Life programında işlenmiştir[15].



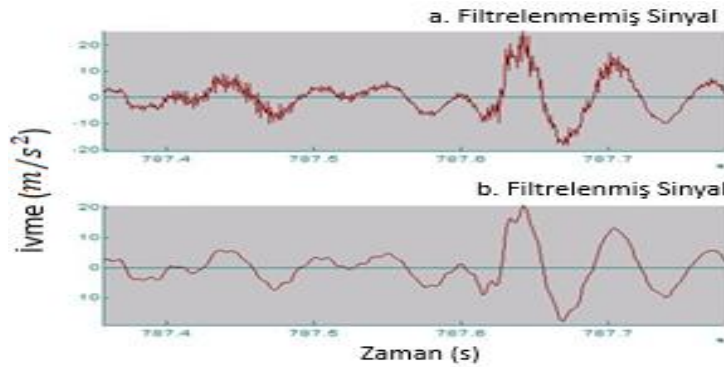
Şekil 3. Veri işleme algoritması

- Spike Analizi: Şekil 4’de, veri toplama sırasında çevresel ve fiziksel faktörlerden dolayı (örneğin voltaj düşüşü, manyetik alan etkisi vb.) bazı “spikeler” meydana geldi. Bu spikeler verileri görsel ve istatistiksel yöntemlerle ortadan kaldırıldı [15,16].



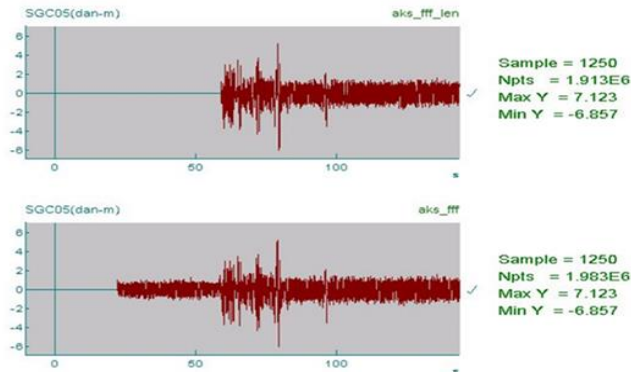
Şekil 4. Araç şaftında strain-gauge verisinde oluşan spike sinyali

- Filtreleme analizi : Şekil 5 de, 100 Hz'nin üzerindeki frekanslara sahip düşük genlikli sinyaller yorulma analizleri için önemli olmadığından, düşük geçişli bir filtreleme kullanılarak 100 Hz üzerindeki sinyaller orijinal verilerden çıkarılmıştır[15,16]. Taşıt süspansiyon parçaları için, yorulma analizleri için önemli frekans aralığı 40 Hz ve 60 Hz arasındadır. Yol simülasyonu için, genellikle 100 Hz' nin üzerindeki sinyaller ihmal edilmiştir[15,16].



Şekil 5. Filtrelenmiş ve filtrelenmemiş verilerin gösterimi

- Aritmetik İşlemler: Sinyallerin toplanması, çıkartılması, çarpılması ve bölünmesi, offset edilmesi gibi vb. fonksiyonları içeren bir işlemdir. Şekil 6’da görüldüğü gibi, teste harekete başlamadan önce sensor kalibrasyonları sırasında ki veri yorulma ömrü hesaplamada kullanışlı olmadığından çıkartma işlemi yapılmıştır[15,16].

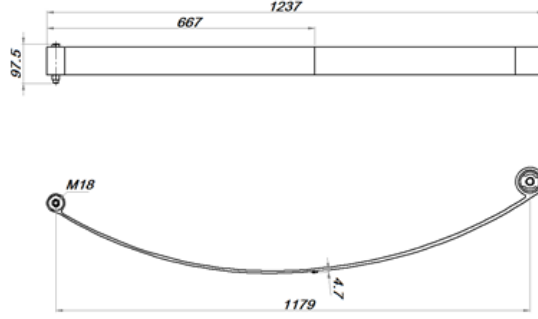


Şekil 6. Aritmetik işlemlerden çıkartma işleminin yapılması

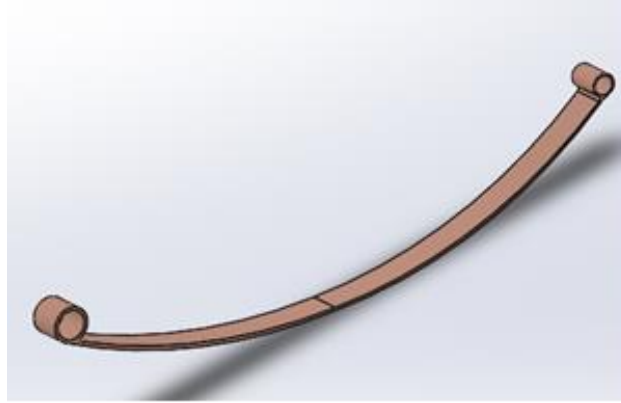
3. SONLU ELEMANLAR ANALİZİ İLE DENEYSEL VERİLERİN BENZEŞİMİNİN KURULMASI (ESTIMATION OF EXPERIMENTAL DATA WITH FEA)

3.1 Arka Süspansiyon Yaprak Yayın Modellenmesi (Rear Suspension Leaf Spring Modeling)

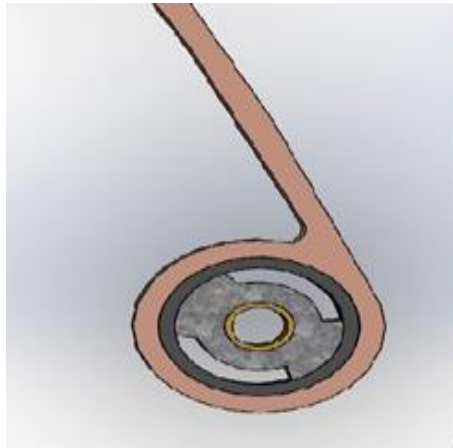
Şekil 7, 8 ve 9'da sırasıyla hafif ticari aracın arka yaprak yayının 2D teknik resim ve CAD modeli Solidworks bilgisayar programı ile oluşturulmuştur[17,18].



Şekil 7. Yaprak yay ve burçlarının teknik resmi 2D



Şekil 8. Yaprak yay burçları çıkarılmış Solidworks CAD çizimi



Şekil 9. Arka yaprak yay burç resimleri

ANSYS programında yay analizi: modelleme, çözüm ve çözüm sonuçlarının değerlendirilmesi olarak üç ayrı modülde gerçekleştirilmektedir. Analizde modele sınır şartlarının tatbik edilmesine kadar olan işlemler programın ön işlemci modülünde (preprocessor), modelin çözülmesi, çözümleyici modülünde (solution) ve ek hesaplamalar ile sonuçların sayısal veya görsel değerlendirilmesi ise son işlemci (general postprocessor) modülünde gerçekleştirilmektedir[19].

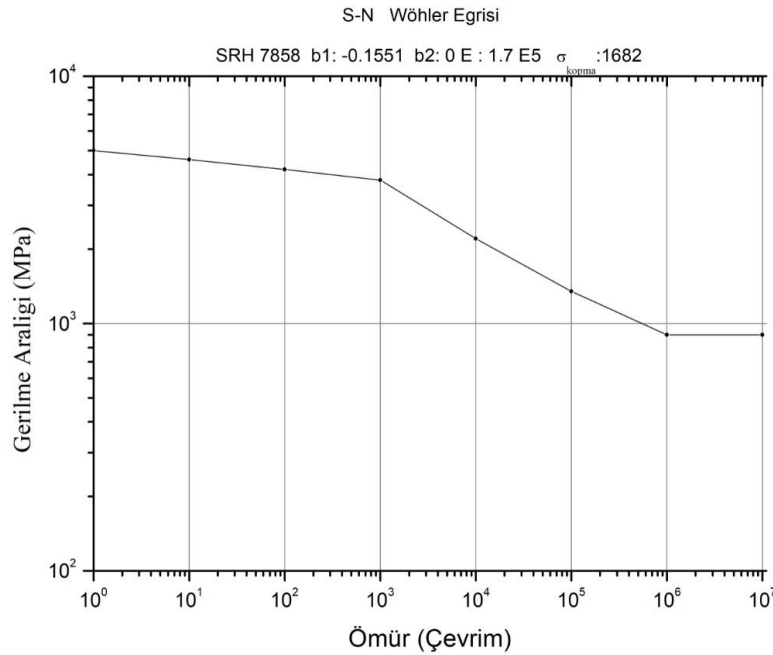
3.2 Yaprak Yay Malzeme Özellikleri ve S-N Eğrisinin ANSYS Programına Yüklenmesi (Leaf Spring Material Properties and S-N Curve Loading into ANSYS Program)

Tablo 2 de yaprak yay malzemesinin mukavemet özellikleri verilmiştir.

Tablo 2. Yaprak yay malzeme özelliği

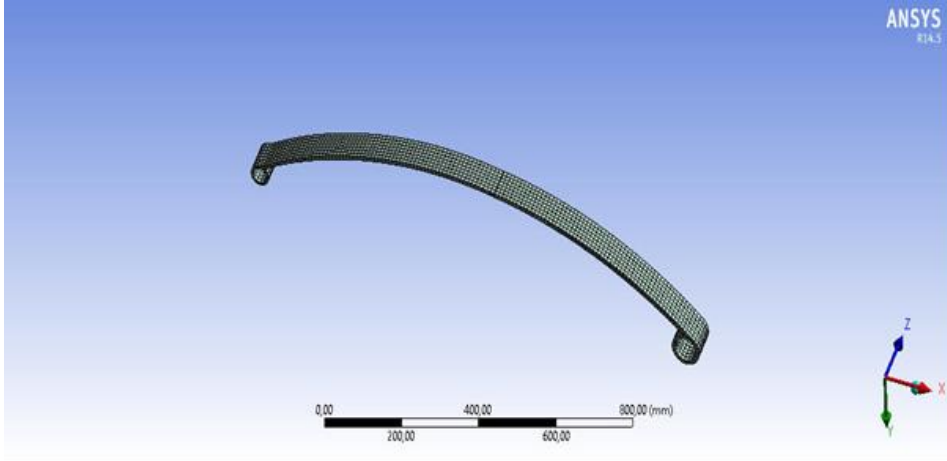
<i>Parametre</i>	<i>Değeri</i>
<i>Elastisite modülü(E)</i>	<i>206 000 N/mm2</i>
<i>Poission oranı (ν)</i>	<i>0.27</i>
<i>Akma gerilmesi (σ_{akma})</i>	<i>1509 N/mm2</i>
<i>Kopma gerilmesi(σ_{kopma})</i>	<i>1682 N/mm2</i>
<i>b₁ :</i>	<i>-0.1551</i>
<i>b₂ :</i>	<i>0</i>

Şekil 10 da yaprak yayda kullanılan malzemenin S-N eğrisi görülmektedir. Bu eğrinin yatay ekseninde 1 den 10 çevrime kadar olan ömür eksenini yer alırken, bu şeklin dikey ekseninde gerilme aralıkları 0 dan 10 'e kadar Mpa cinsinden verilmiştir. Bu şekilde b1 olarak adlandırılan basquin eğrisinin eğimi b1=-0.1551 b2=0



Şekil 10. S-N Wöhler eğrisi

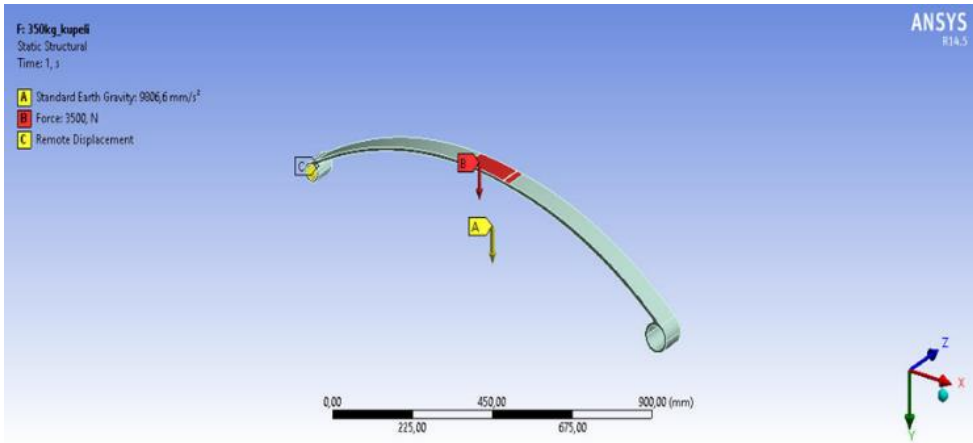
Şekil 11 de gösterildiği gibi arka süspansiyon yayı Ansys programında sonlu elemanlar analizi için Solid73 hegzagon eleman ve kritik yerlerde ise tetragon eleman tipi seçilerek mesh yapılmıştır[20,21]. Yaprak yayda 1456 hegzagon ve burçların olduğu yerde hassasiyeti artırmak için tetragon eleman kullanılarak toplam 9952 düğüm noktası ile ağ oluşturma(meshing) yapılmıştır[16,20,21].



Şekil 11. Yaprak yayın meshlenmiş resmi

3.4 Yaprak Yay Sınır Koşulları(Boundry Condition of Leaf Spring)

Şekil 12 de görüldüğü gibi yaprak yay araç üzerinde sağda büyük burç sabit şaseye bağlı dolayısıyla x ve y de hareketsiz z de dönmeye serbest iken küçük burç ise bir küpe vasıtasıyla hem x doğrultusunda uzamaya hem de z yönünde dönmeye maruz bırakılmaktadır[16].



Şekil 12. Yaprak yay sınır koşulları

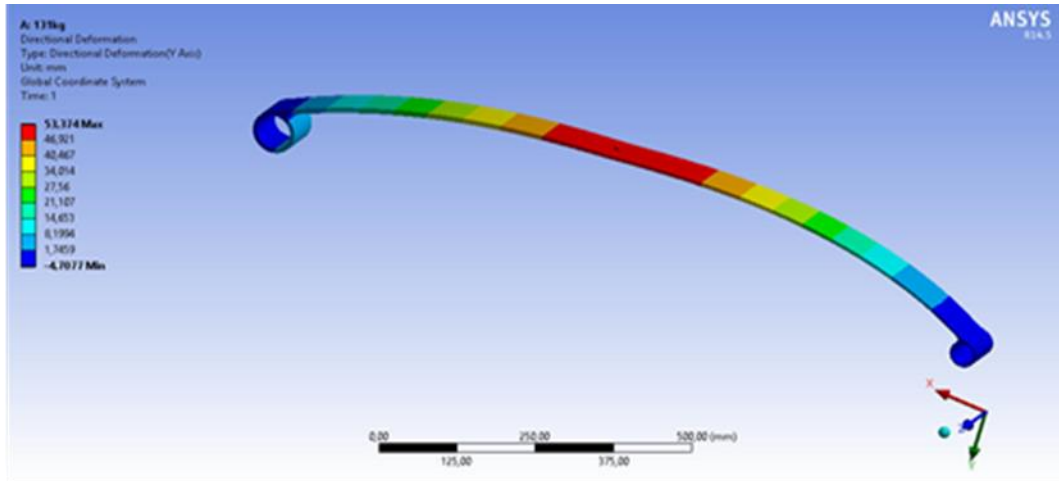
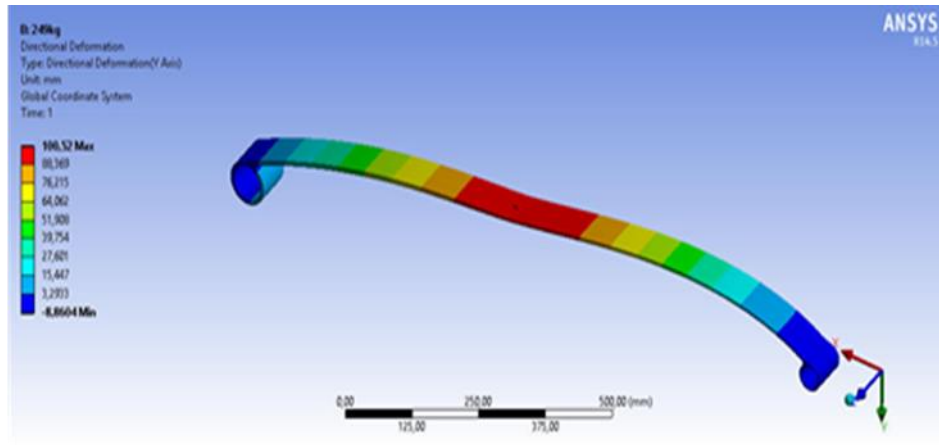
3.5 Yaprak Yay Statik Analizinin Giriş Kabul Testleri ile Bilgisayar Analizlerinin Mukayesesi(Comparison of Leaf Spring Static Analysis with Intake Acceptance Tests and Computer Analysis

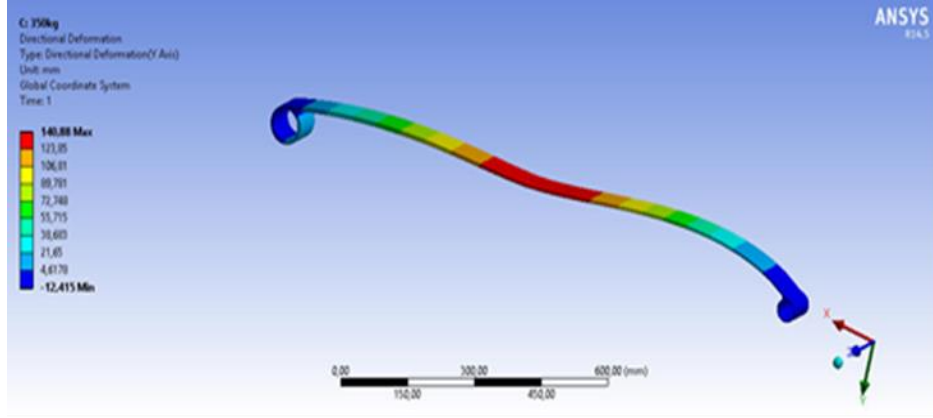
İlgili firma giriş kalite kontrol testlerinden alınan gerçek ölçüm değerleriyle yaprak yayın bilgisayarda simülasyonları sonucundaki yakınsamalar statik analiz sonuçlarıyla yakınsama karşılaştırmaları Tablo 3’de verilmiştir. Tablo 3’den görüldüğü gibi ilgili otomobil firmasının yaprak yay giriş kalite kontrolünde kabul kriteri olarak yapılan gerçek çökme testine ait uygulanan yükler 131, 249 ve 350 kg karşılık gelen laboratuvar çökme testleri 51 mm, 102 mm ve 144 mm olarak belirlenmiştir.

Tablo 3 Yaprak yay laboratuvar ve bilgisayar test sonuçları

<i>Firma Yaprak Yay Çökme Testi ve Sanal Analiz Sonuçları</i>			
<i>Uygulanan kuvvet</i>	<i>Kalite Giriş gerçek test sonucu</i>	<i>Bilgisayar Simülasyonu</i>	
	<i>Küpesiz</i>	<i>Büyük burç sabit küçük burç yatayda hareketli</i>	
131 kg	51 mm	<i>Küpesiz</i>	<i>Küpelı</i>
249 kg	102 mm	53 mm	19.6 mm
350 kg	144 mm	100.5 mm	37.0 mm
		140 mm	51.8 mm

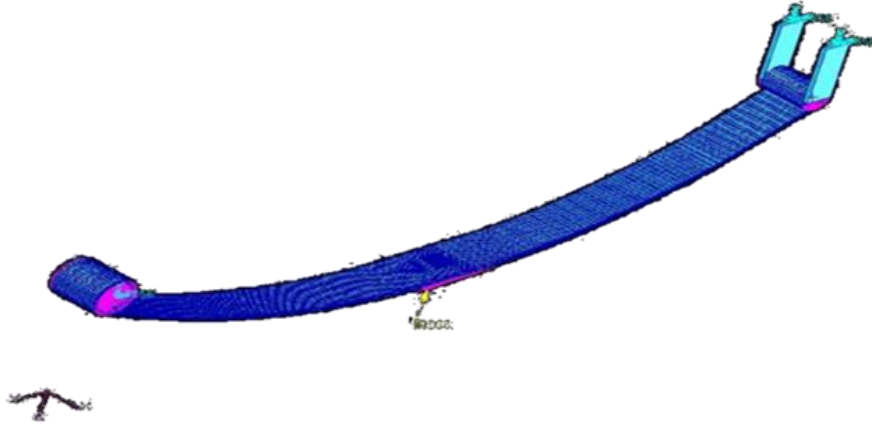
Bilgisayar simülasyonun da Şekil 13,14 ve 15 sırasıyla görüldüğü gibi yaprak yayın tam ortası; araç köprüsüne yatakladığı yerde, yayın tam ortasında 103x68 mm alana aynı kuvvetler uygulandığında küpesiz kısımla sırasıyla 53 mm, 100.5 mm ve 140 mm gibi çökme ele edilmiş ve hata toleransı olarak % 3 miktarını geçememektedir[16,19].

**Şekil 13.** 131 kg yaprak yay statik analizi**Şekil 14.** 249 kg yaprak yay statik analizi



Şekil 15. 350 kg yaprak yay statik analizi

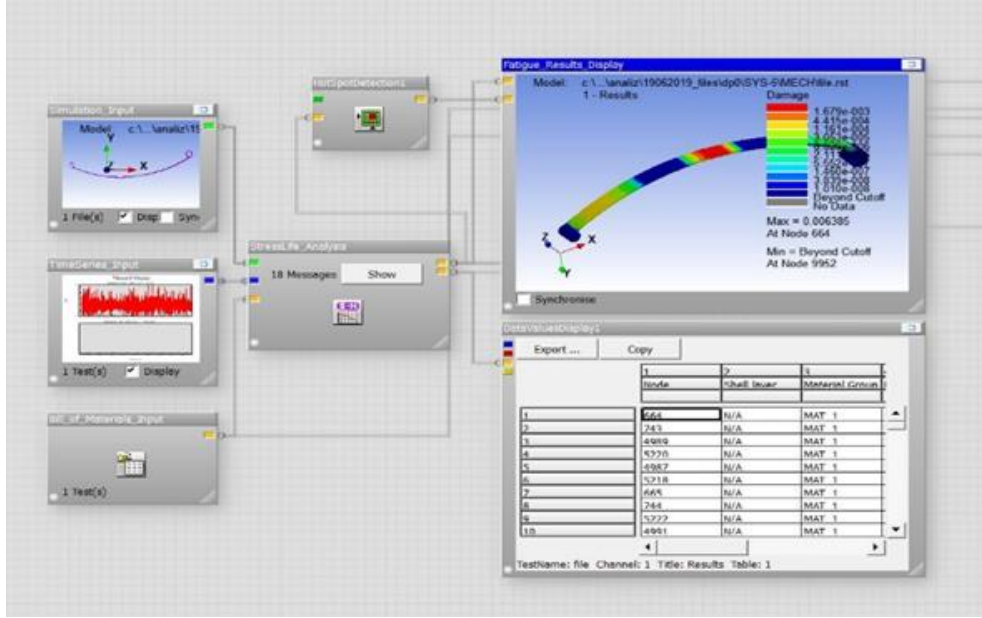
Tablo 1'in en sağındaki kolonda ise yine aynı kuvvetler bilgisayar ortamında yaprak yaya küpeli montajında uygulandığında elde edilen değerler görülmektedir. Tablo 1'den görüldüğü gibi küpeli ve küpesiz sonuçlar birbirine oranlandığında yaklaşık 2,7 oranında araca gelen kuvvetlerin indirgeniği saptanmıştır[16]. Şekil 16 da yaprak yay araç montaj modeli görülmektedir. Yaprak yay firma kalite giriş kabul kriterinden farklı olarak küçük burç tarafında bir küpe ile araca bağlanarak büyük burç yalnızca z de dönerken küçük burç hem x yönünde hareket ve z yönünde dönme serbestlik derecesine sahiptir.



Şekil 16. Yaprak yay küpeli montaj resmi araç modeli

3.7 Arka Yaprak Yay Yorulma Analizi (Rear Leaf Spring Fatigue Analysis)

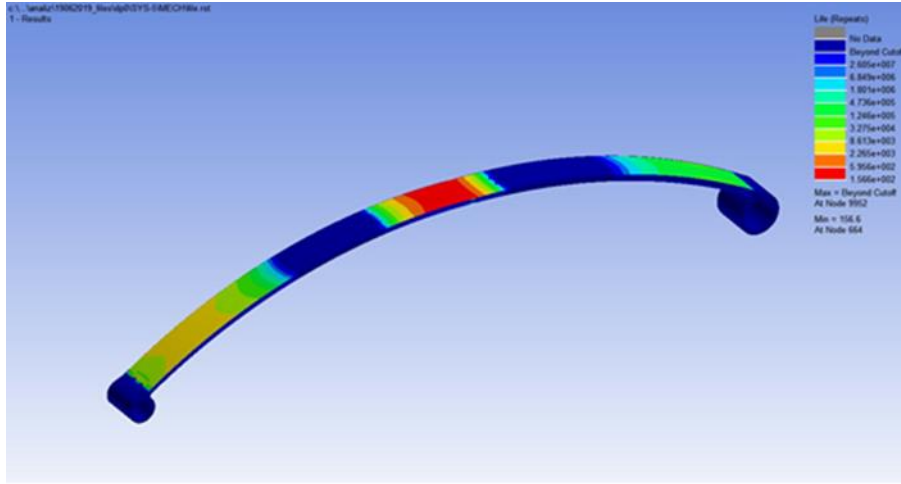
Yaprak yay yorulma analizinde Ansys de elde edilen static sonuçlardan sonar veriler, nCode yazılımının Design Life kısmına aktarılmıştır[15,19]. Şekil 17 de görüldüğü gibi Design Life'a Ansys programında işlem görmüş yayın CAD modeli, Dış yük verisi, yaprak yay malzemesinin özellikleri ve yorulma eğrilerinin tanıtımı yapıldıktan sonra S-N metodu temel alınarak en büyük asal gerilmeyi de hesaba katan Von-Misses yöntemine göre dış yük verisi 20 km den bir otomobilin yorulma ömrü olarak kabul edilen 200.000 km ye Excel de hesaplanarak oluşturulan bu yol yük verisi ile parçanın yorulma analizi Miner kuralı referans alınarak yapılmıştır[15,16,19,22,23].



Şekil 17. Yaprak yay yorulma analizi

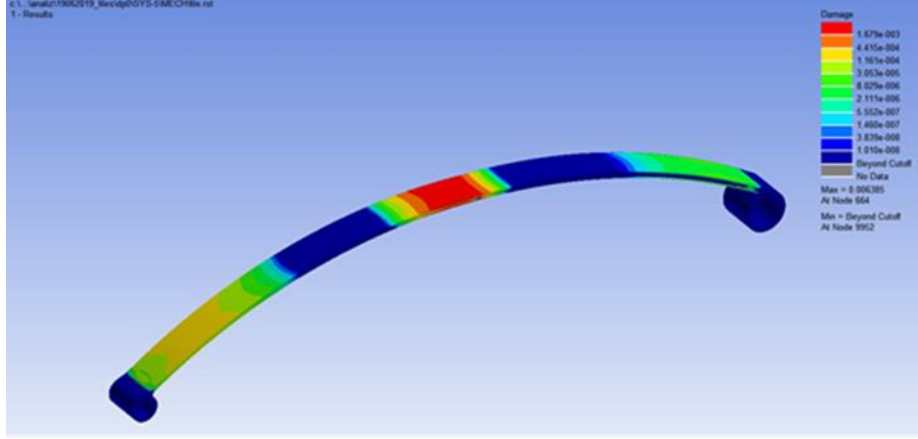
4. SONUÇ (CONCLUSION)

Şekil 18’de ANSYS programı ile yapılan yaprak yay yorulma analiz sonuçları ömür açısından verilmiştir. Burada kırmızı olarak yükün uygulandığı yerde ömür en kritik seviyesi 156,6 kat 200.000 km tekrar ettiğinde kırılma başladığını dolayısıyla oldukça sonsuz bir ömre sahip bir parça olduğu ortaya çıkmıştır.



Şekil 18. Yaprak yay yorulma analizi ömür hesabı

Şekil 19’ da arka yaprak yayın 200.000 km hasar analiz sonuçları verilmiştir. Bu analizden yaprak yayda % 0,6 hasar miktarı olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 19. Yaprak yay yorulma analizi hasar hesabı

Bu çalışmada HTA için güvenilirlik ve yorulma test parkurlarının her iki içinde farklı oranda kullanılan çukur, tümsek ve bozuk yol profilinden oluşan ağır yol parkuru fabrika civarında tespit edilip karakteristik verileri ölçülerek kullanılabilir hale getirilmiştir.

Farklı sinyallerin işlenmesinden, sınıflandırılmasından ve normalleştirilmesinden sonra, matematiksel bir test profili 200.000 km lik yorulma etkisi standartlaştırılmıştır.

SEA modellerinde hexagon tipi 3D elemanın daha iyi sonuç verdiği için kritik yerler hariç genelde hegzagon tipi elemanla meshleme yapılmıştır.

Yapının sanal analizinde kullanılan lineer analiz yöntemi bu tür yaprak yay için daha kesin sonuçlar vermiştir.

Döngü sayısının oldukça yüksek olması nedeniyle S/N yorulma yöntemi daha uygun olduğu tespit edilmiştir.

Yorulma parkuru en ağır yük verisi uyguladıktan sonra arka yaprak yay da öngörülen 200.000 km'de yorulma hasarı olmadığı doğrulanmıştır.

Tablo 3'den görüldüğü üzere bilgisayar yöntemiyle sanal analizlerin gerçek test verilerine en fazla %3 hata ile yakınsadığı tespit edilmiştir. Buda zaman ve para açısından kullanılan gerçek yol testlerine göre bilgisayar destekli hesaplama metodolojilerini kullanmanın ürün geliştirme açısından çok avantajlı olduğu görülmüştür.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışma TOFAŞ A.Ş. tarafından desteklenmiştir. Katkılarından dolayı TOFAŞ.A.Ş.'ne teşekkürlerimizi sunarız.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] P.Heyes,X.Lin,A.Buczynski,M.Brown, Application of biaxial plasticity and damage modeling for the life prediction and testing of automotive components, Proc.of the 5th International Conference on Biaxial/multiracial Fatigue and Fracture, Cracow, Poland(1997)
- [2] R.Kuota, D.Play, Correlation procedures for fatigue life determination, Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME 121 (1999),PP.289-296
- [3] P.K.Paul,R.K.Dunga,A.Verma,A.V.Minakar,S.Raju: Techniques for accelerated design validation of tractor chasiss,SAE Paper 01(2001),pp.1-50
- [4] V.Grubicic, Determination of load spectra for design and testing, International Journal of Vehicle Design 15 (1994), pp.8-26

- [5] Case Study – Complete customer usage profiling example raw data through track correlation to accelerated rig drive in 4 days, Iveco, Italy, nCode , UK, (1999)
- [6] D.Filippo, M Macro, B.Thomas, R.Christophe, Structural characterization of vehicle on a rig test versus different road profiles analysis of experimental results, LMS International, Belgium Vol. 54 (2001), pp. 251-258
- [7] M.Fantacchiotti, M.Vianello, Gradual improvement of the vehicle reliability up to the target value, FIAT Auto SpA Design Engineering Department, 4th International Conference (1994)
- [8] C.Marchesani, F.Parmigiani, M.Vianello, Integrated method to define the mission profile of a passenger car, FIAT Auto SpA (1979), pp. 45-54 (in Italian)
- [9] M.Fantacchiotti, M. Vianello, Accelerated reliability test for vehicles and correlation with actual use, Proceeding of the 3rd International Conference ATA Innovation and Reliability in Automotive Design and Testing (1992), pp.1-9
- [10] Y.S.Kong, M.Z.Omar, L.B.Chu, S.Abdullahac Fatigue life prediction of parabolic leaf spring under various road conditions, Engineering Failure Analysis Volume 46, November 2014, Pages 92-103 <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2014.07.020>
- [11] P. Borkovic, B.Sustarsic, B.Susec, M.Malesevic, B.Zuzec,B.Podgornik,V.Loskovsec Fatigue Life Behaviour and a lifetime assessment of a double leaf spring using fem based software UDK 620.178.3:519.61/.64 ISSN 1580-2949 Original scientific article/Izvirni znanstveni ~lanek MTAEC9, 46(4)345(2012)
- [12] B. Ozmena, B.Altiok, A. Guzel, İ. Kocyigit, S. Atamera, A novel methodology with testing and simulation for the durability of leaf springs based on measured load collectives’’3rd International Conference on Material and Component Performance under Variable Amplitude Loading, VAL2015, Elsevier : Procedia Engineering 101 (2015) 363–371 : Available online at www.sciencedirect.com
- [13] M. M. Shokrieh, D. Rezaei , Analysis and optimization of a composite leaf spring, Elsevier [www.elsevier.com/locate.compostruc](http://www.elsevier.com/locate/compostruc). Composite Structures 60 (2003) 317–325
- [14] A.Ş.Şener: Finite element based vehicle component fatigue life assessment according to a customer usage profile, Materials Testing V 56 (2014) pp. 198-207
- [15] ANSYS nCode Design Life 14.5
- [16] A.Ş.Şener, Fatigue life determination of the leaf spring on the light commercial vehicle according to Turkish Mission Profile (in Turkish), Istanbul, Turkey (2003)
- [17] A.Ş.Şener,. (2018). Müşteri Korelasyonuna Göre Hafif Bir Ticari Otonun Yorulma Test Parkurunun Oluşturulması. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji, 6 (2), 345-357. DOI: 10.29109/http-gujsc-gazi-edu-tr.356835
- [18] Solidworks (2018)
- [19] Ansys Workbench 14.5
- [20] N.W.M. Bishop, F. Sherratt, Finite element based fatigue calculation, NAFEMS- International Association for the Engineering Analysis Community LTD, www.nafems.org.2000
- [21] The Ncode Book of Fatigue Theory, Ncode Technical Reference Book V 4.3, Document rel1.0, (2000)
- [22] Excell (2016)
- [23] M.A.Miner, Cumulative damage in fatigueMagnetics® Databook

Real-Time Hardware-In-The-Loop Simulation of Electric Drive Systems: An Implementation of Permanent Magnet Synchronous Machine Drive

Nuh ERDOĞAN 

University College Cork, Marine and Renewable Energy Centre, P43 C573, Cork/Ireland

Graphical/Tabular Abstract

Article Info:

Research article

Received: 24/06/2019

Revision : 23/09/2019

Accepted: 06/10/2019

Highlights

- Hardware-in-the-loop real-time simulation.
- PMSM drive.
- Multi-core CPU
- FPGA.

Keywords

Hardware-in-the-loop
 Real-time simulation
 GPU
 PMSM
 Multi-core CPU
 FPGA

In this study, the hardware used in real-time HIL simulation of electric drive systems are comparatively examined, and suitable platforms are suggested with respect to applications of electric drive systems. In the case study, a real-time simulation of vector controlled permanent magnet synchronous machine (PMSM) drive system is performed on a hybrid parallel hardware platform with an Intel core at 3.0 GHz and a field programmable gate array (FPGA), and the issues associated with the real-time simulation are discussed.

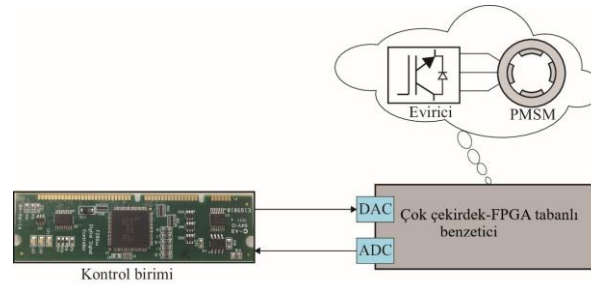


Figure A. Schematic representation of HIL simulation of PMSM drive

Purpose: This study aims at examining the real-time simulation hardware used in electric drive systems and performing a real-time simulation of vector controlled permanent magnet synchronous machine drive. In line with obtained experiences, it is also aimed at giving perspectives in choosing suitable simulation hardware for real-time hardware-in-the-loop (HIL) simulation of electric drive systems.

Theory and Methods: Real-time HIL simulation hardware and their technologies for electric drive systems are comparatively examined and classified with respect to system scale and dynamic response time. A vector controlled PMSM drive model is then developed in Matlab/Simulink. The real-time simulation of the drive is finally performed on a multi-core, FPGA based parallel hardware platform.

Results: The results have shown that a PMSM drive at 10 kHz can be simulated in real-time on multi-core, FPGA based hardware. The results are presented, and the issues associated with the real-time simulation are discussed in detail in Section 3.

Conclusion: This results in this study has confirmed that the real-time HIL simulation of electric drive systems running up to several kHz, can be realized on multi-core based parallel hardware platforms. The drive systems running in the range of hundreds of kHz can require FPGAs in their real-time HIL simulation. In these applications, the real-time technologies which enable to use automatic HDL coder in generating VHDL / Verilog code like SIMULINK HDL coder can be advised for those who are not expert in developing HDL. GPUs or inter-connected multi-FPGAs can be suggested for the real-time simulation of large scale electric drive systems with the system dynamics at milliseconds and microseconds.

GU J Sci, Part C, 7(4): 802-817 (2019)



Gazi Üniversitesi

Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ


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

Elektrikli Sürme Sistemlerinin Gerçek Zamanlı Döngüde Donanımsal Benzetimi ve Kalıcı Mıknatıslı Bir Senkron Motor Sürücü Uygulaması

Nuh ERDOĞAN 

University College Cork, Marine and Renewable Energy Centre, P43 C573, Cork/Ireland

Öz

Döngüde donanımsal benzetim (DDB), gerçek zamanlı benzetime imkân veren ve son yıllarda hem araştırmada hem de endüstriyel ürün geliştirmede yaygın bir şekilde kullanılan bir tekniktir. Bu yöntemde kullanılan benzeticiler gerçek zamanlı benzetim gerçekleştirebilen platformlardır. Platformun seçimi, modelleme esnekliği ile yüksek doğruluk oranlı sistem gerçek zaman davranışını elde etme yönlerinden önemlidir. Bu çalışmada, elektrik sürme sistemlerinin benzetiminde kullanılan DDB yapıları tanıtılmış, gerçek zamanlı DDB'yi gerçekleştirebilen benzetim platformları karşılaştırılmalı incelenmiş ve elektrikli sürme sistemleri uygulama alanlarına göre uygun platform önerilerinde bulunulmuştur. Durum çalışmasında, örnek bir vektör kontrollü kalıcı mıknatıslı senkron motor (KMSM) sürücüsünün gerçek zamanlı benzetimi 3.0 GHz'de çalışan Intel işlemci çekirdeği ve bir SPARTAN-3 kullanıcı programlamalı kapı dizisi (FPGA) içeren, paralel işleme izin veren karma bir platformda gerçekleştirilmiş ve gerçek zamanlı benzetimde karşılaşılan meseleler tartışılmıştır. Sonuçlar, vektör kontrollü bir KMSM sürücüsünün gerçek zamanlı DDB'sinin çok çekirdekli işlemci ve FPGA içeren benzetici ile gerçekleştirilebileceğini göstermiştir. Sonuçlar doğrultusunda, daha yoğun hesaplama içeren ve daha yüksek frekanslı anahtarlamalı elemanlara sahip kontrol sistemlerinin DDB'si için uygun gerçek zamanlı benzetici platform önerilerinde bulunulmuştur.

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 24/06/2019
Düzeltilme: 23/09/2019
Kabul: 06/10/2019

Anahtar Kelimeler

Döngüde donanımsal benzetim
Gerçek zamanlı benzetim
GPU
Kalıcı mıknatıslı senkron motor
Çok çekirdekli işlemci
FPGA

Keywords

Hardware-in-the-loop simulation
Real-time simulation
GPU
PMSM
Multi-core CPU
FPGA

Real-Time Hardware-In-The-Loop Simulation of Electric Drive Systems: An Implementation of Permanent Magnet Synchronous Machine Drive

Abstract

Real-time hardware-in-the-loop (HIL) simulation has recently become convenient method in both research and industrial product development. The simulators used in HIL simulation includes hardware platforms that enables a real-time simulation. The choice of suitable platform is important in terms of providing modeling flexibility and mimicking real-time behavior with higher accuracy. In this study, HIL structures used in real-time simulation of electric drive systems are presented, hardware-assisted real-time simulators are comparatively assessed, and suitable platforms are suggested with respect to the applications of electric drive systems. In the case study, a real-time simulation of vector controlled permanent magnet synchronous machine (PMSM) drive system is performed on a hybrid parallel hardware platform with an Intel core at 3.0 GHz and a field programmable gate array (FPGA), and the issues associated with the real-time simulation are discussed. It is shown that the real-time HIL simulation of a vector controlled PMSM drive can be realized on a multi-core and FPGA based hybrid platform. In line with the results, suitable real-time HIL simulation platforms are suggested for the control systems with more computationally intensive and higher switching frequency components.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

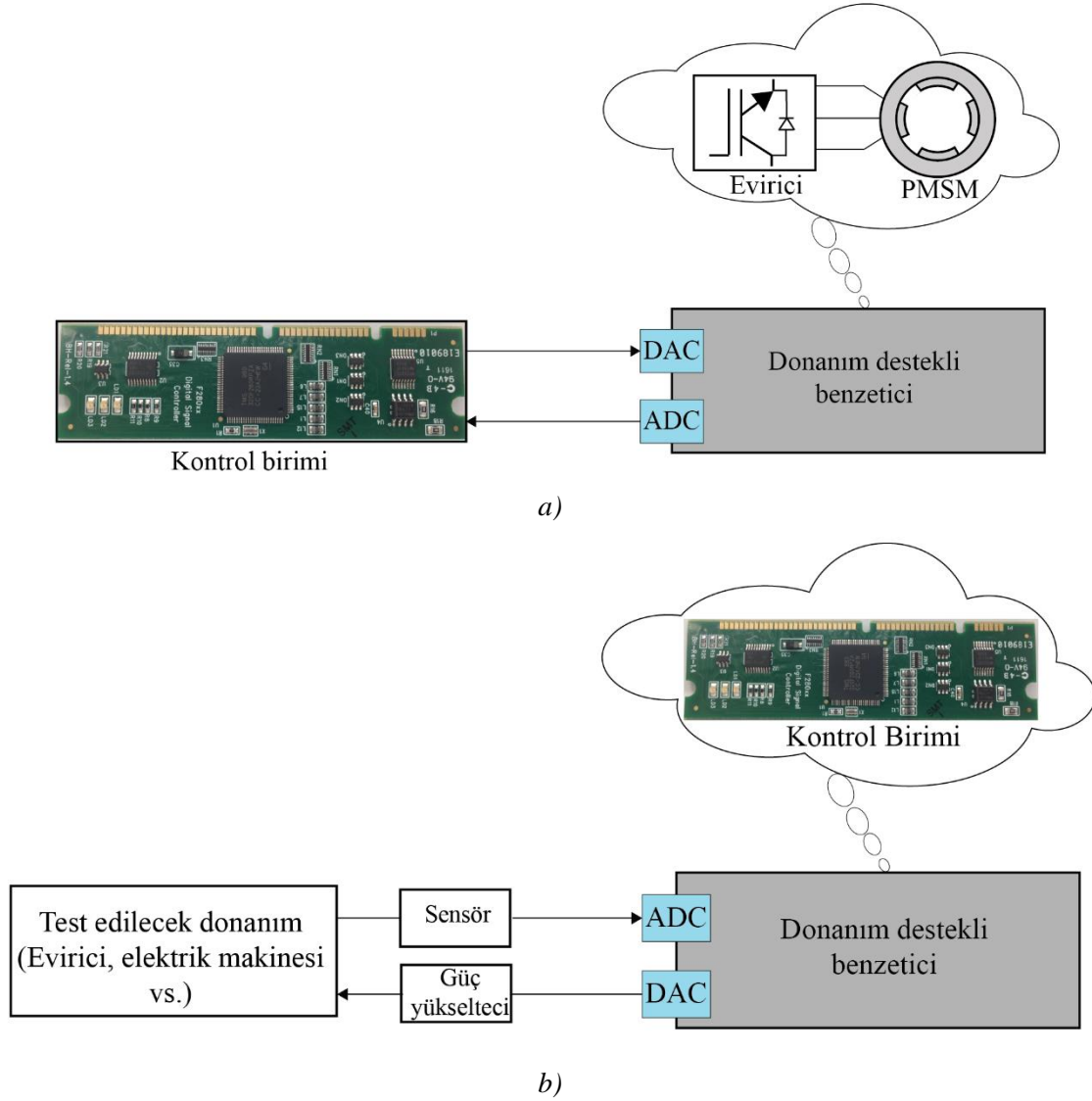
Tasarım doğrulama ve test etme işlemlerinde gerçek zamanlı benzetime ihtiyaç duyulması, döngüde donanım teknolojisinin doğmasına ve gelişmesine neden olmuştur [1, 2]. Döngüde donanım teknolojisi, fiziksel bir sistem modelinin gerçek zamanlı benzetimine imkân veren donanımlardır. Bu teknoloji, sistemin herhangi bir parçasının (örneğin donanımda modellenen sistemi denetleyen kontrol birimi gibi) fiziksel olarak benzetime dahil edilmesine imkân verir [3]. Dolayısıyla, benzetim esnasında harici gerçek

sistem tarafından üretilen sinyaller giriş olarak alınır. Bu nedenle bu yapı, DDB olarak adlandırılır. Benzetimin yapıldığı donanımın çıkışları gerçek sistemdekine denk analog veya sayısal sinyallerdir. Gerçek sistem üzerinden bir sinyal ölçülmesine benzer şekilde, donanımın çıkışları ölçülebilir veya bir osiloskop ekranında görüntülenip, değerlendirilebilir. Tasarlanan bir kontrol sisteminin performansı DDB kullanılarak birçok farklı ve aşırı koşullar için değerlendirilebilir [4]. Özellikle gerçek fiziksel sisteme ulaşmanın zor olduğu (uzay, havacılık alanları gibi) veya gerçek sistem üzerinde doğrudan test yapmanın riskli olduğu durumlarda DDB tekniğinden yararlanır. DDB ile, tasarım doğrulama ve test işlemleri hızlandırılabilir ve maliyet azaltılabilir. Çünkü, test işlemi için büyük deneysel altyapılar kurmaya gerek kalmaz. Ayrıca, fiziksel sistem üzerinde testler gerçekleştirilmediği için, oluşabilecek muhtemel hasarlar da önlenmiş olur. Sonuç olarak, tasarlanan kontrol sisteminin fiziksel sistem üzerindeki davranışı ve performansı DDB ile gerçek zamanlı değerlendirilebilir [5].

Literatürde, gerçek zamanlı benzetim yapısına göre elektrikli sürücü uygulamaları için iki farklı DDB yapısı sunulmuştur [6]. Şekil 1.a'da gösterilen birinci DDB yapısında, tasarlanan kontrol birimi fiziksel olarak benzetime dahil edilirken sistemin güç katının (Motor ve evirici grubu) modellenmesi ve benzetimi donanım destekli bir platformda gerçekleştirilir. Bu yaklaşım, birçok farklı test durumlarının gerçek zamanlı benzetimlerinin gerçekleştirilmesine izin verir. Böylece, bir yandan geliştirilen kontrol biriminin sistem üzerinde davranışı gerçek zamanlı analiz edilirken, test ve doğrulama işlemlerinin süresi ve maliyeti mümkün mertebe azaltılır. Örneğin, bir rüzgâr çiftliği için tasarlanan bir elektrik motor ve sürücü sistemin bir iletim hattı üzerinde davranışı bu yöntem ile gerçek zamanlı test edilebilir [7]. İkinci yaklaşımda ise, kontrol birimi donanım destekli platformda tasarlanırken, güç katı birimi fiziksel olarak benzetime dahil edilir (Şekil 1.b). Bu yaklaşım, özellikle incelenen sistemin modellenmesinin zor olduğu ve geliştirilen kontrol biriminin testlerinin sistem üzerinde doğrudan yapılmasının riskli olmadığı durumlarda tercih edilir. Bu yöntemde, geliştirilen farklı kontrol algoritmalarının testi gerçek sistem üzerinde hızlı bir şekilde test edilir.

Donanım destekli benzetimler, paralel işleme imkân tanıyan ve bünyesinde birçok işlemci bulunduran gerçek zamanlı benzetim gerçekleştirebilen platformlardır [5]. Bu platformlar; çok çekirdekli işlemciler [8], kişisel bilgisayar (PC) kümeleri [9], kullanıcı programlamalı kapı dizileri (FPGA'lar) [10], grafik kullanıcı ara yüzleri (GPU'lar) [11, 12] olabilir. Bu benzetimlerde, sistem modeli parçalara ayrılır ve her bir model parçası farklı bir işlemci üzerinde paralel bir şekilde çözülür. Böylece, hesaplama yönünden yoğun ve karmaşık sistemlerin benzetimi, her bir işlemcide sistemin bir parçası çözülecek şekilde uygun bölümlere ayrılarak optimize edilir.

Bu çalışmanın amacı; elektrikli sürme sistemlerinin gerçek zamanlı DDB'sinde kullanılan donanımları incelemek, vektör kontrollü örnek bir kalıcı mıknatıslı senkron motor (KMSM) sürücüsünün gerçek zamanlı DDB'sini gerçekleştirmek ve elde edilen deneyim ile elektrikli sürme sistemlerinin gerçek zamanlı DDB'sini gerçekleştirecek kullanıcılara benzetim platformun seçimi için bir perspektif sunmaktır. Öncelikle, Bölüm 2'de gerçek zamanlı benzetimde kullanılan donanımlar karşılaştırmalı olarak incelenmiş, bu donanımların kullanıldığı mevcut gerçek zamanlı DDB teknoloji ürünlerin, donanım mimarileri, işletim sistemleri, haberleşme protokolleri, harici donanım ile ara yüzleri, modelleme araçları ve uygulama alanları karşılaştırmalı incelenmiştir. İncelenen DDB platformları, elektrikli sürme sistemleri için sistem ölçeği ve dinamik hızına göre sınıflandırılmıştır. Bölüm 3'te, örnek bir vektör kontrollü KMSM'nin gerçek zamanlı benzetimi karma bir platformda gerçekleştirilmiş ve gerçek zamanlı benzetim sonuçları irdelenmiştir. Sonuç bölümünde, daha yoğun hesaplama içeren ve daha yüksek frekanslı anahtarlamalı elemanlara sahip elektrikli sürme kontrol sistemlerinin gerçek zamanlı DDB'si için uygun benzetici platform önerilerinde bulunulmuştur.



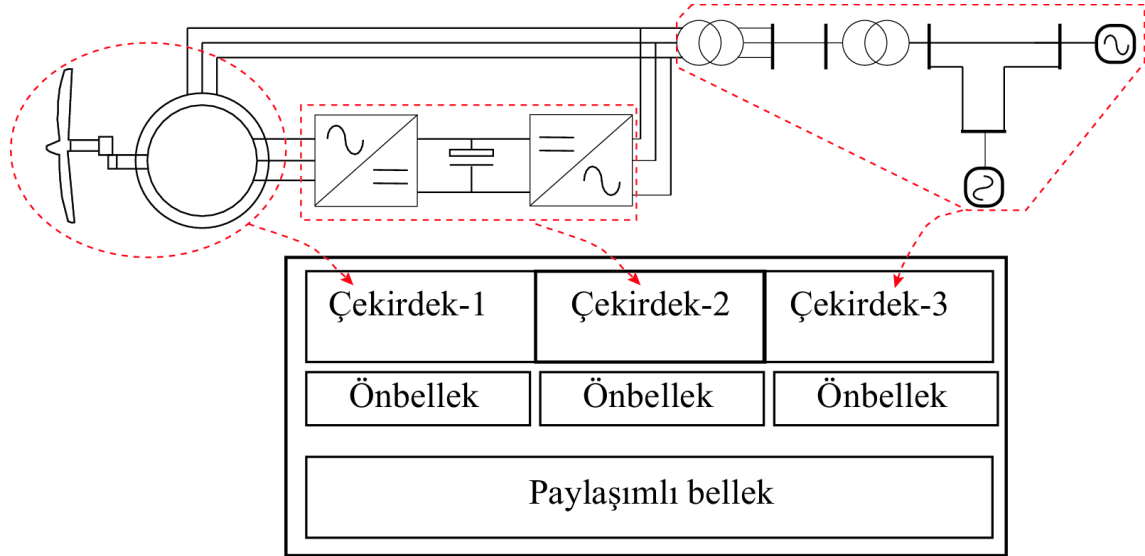
Şekil 1. Bir elektrikli sürücü sisteminin döngüde donanımsal benzetim yapısı, (a) döngüde kontrol birimi, (b) döngüde güç katı birimi

2. ELEKTRİKLİ SÜRME SİSTEMLERİ İÇİN GERÇEK ZAMANLI DDB PLATFORMLARI (REAL-TIME HARDWARE-IN-LOOP SIMULATION PLATFORMS FOR ELECTRIC DRIVE SYSTEMS)

2.1. Gerçek Zamanlı Benzetici Donanımları (Real-time Simulation Hardware)

Son yarım asırda, elektrikli sürme sistemlerinin benzetimi tek işlemcili ve ardışık işlem çevrimlerine dayanan programlar ile gerçekleştiriliyordu [13, 14]. Bu benzetimlerin en önemli dezavantajı, çok sayıda durum değişkeni içeren, hesaplama yönünden yoğun sistemlerin (büyük ölçekli bir güç sistemi gibi) model çözümlerinin çok uzun zaman alması ve dolayısıyla gerçek zamanlı benzetimlerinin yapılamamasıdır [15, 16]. Bu durumlar için çözüm yolu, paralel işleme izin veren donanım destekli platformların kullanılmasıdır [17]. Bu platformlar, bünyelerinde çok sayıda işlemci barındırırlar. Her bir işlemci birbirinden bağımsız paralel çalışır ve sistemin modelinin belli bir kısmını çözer. Böylece, bütün modelin çözümünün yürütülmesi, kullanılan platformun hesaplama gücüne ve sistemin karmaşıklığına bağlı olarak önemli oranda hızlandırılır. Ayrıca, seçilecek benzetici türüne bağlı olarak, bölünen her bir parça sistem dinamiklerine uygun olarak farklı hesaplama adımları ile çözümlenerek optimize edilebilir. Örneğin, Şekil 2’de bir rüzgâr enerji sisteminin çok çekirdekli bir işlemcide benzetimin yapısı gösterilmiştir. İncelenen sistem, dinamiklerine göre üç modüle ayrılmış ve her bir modülün çözümü paralel bir şekilde ayrı bir çekirdekte gerçekleştirilmektedir. Daha önemlisi, her bir çekirdekte hesaplama adımı, modüllerin sistem dinamiklerine

göre uygun bir şekilde seçilir. Diğer yandan, gerçek zamanlı benzetim gerçekleştirebilen bu platformlar genellikle ölçeklenebilir [18]. Gerçek zamanlı benzetimi yapılacak sistemin gerektirdiği hesaplama yüküne bağlı olarak platformun yapısı ve karakteristiği, dolayısıyla hesaplama gücü artırılır. Platformun ölçeğinin büyütülmesinde, bileşenler arasındaki haberleşmede yaşanan gecikme sınırlayıcı bir etken olarak göz önünde bulundurulur.



Şekil 2. Bir rüzgâr enerji sisteminin çok çekirdekli bir işlemcide gerçek zamanlı benzetim yapısı

Literatürde elektrikli sürme sistemlerinin DDB'sinde dört farklı platform öne çıkmaktadır. Bu platformlar; (i) Çok çekirdekli işlemciler, (ii) PC kümeleri, (iii) FPGA'lar, (iv) GPU'lar. Çok çekirdekli işlemciler, bir yonga üzerinde birden fazla çekirdek ve ortak bir bellek içeren yapılardır. Harici fiziksel sistemle bağlantı veri yolu (PCI veya PCI-e) ile sağlanır. Benzetimi yapılacak sistem modeli, uygun bir şekilde parçalara ayrılır ve her bir model parçası ayrı bir çekirdekte paralel çözülerek tüm sistemin benzetimi optimize edilir. Çok çekirdekli işlemciler, kullanıcı dostu paket programlar (örneğin SIMULINK) kullanılmasına imkân vererek modelleme yönünden esneklik sağlar ve düşük maliyetlidir. Bu nedenle, çok çekirdekli işlemci tabanlı eMEGASIM, Hypersim, gibi platformlar elektrikli sürme devrelerinin DDB'sinde yaygın olarak kullanılmaktadır [19, 20]. Çok çekirdekli işlemcilerin başlıca dezavantajı, veri yolundan kaynaklanan yüksek girdi-çıkış (I/O) gecikme süresi ve dolayısıyla benzetim hesaplama adımının yüksek olmasıdır. Bu nedenle, yüksek frekanslı darbe genişlik kiplenmeli (PWM) motor sürücülerin bu tip platformlarda benzetiminin yapılması pratik değildir. Bununla birlikte, girdi-çıkış gecikme süresinin azaltılması için eMEGASIM gibi platformlarda FPGA tabanlı kartlar ara yüz elemanı olarak kullanılmaktadır [21]. Böylece hesaplama adımı, mili saniye mertebesinde mikro saniye mertebelerine azaltılabilmektedir.

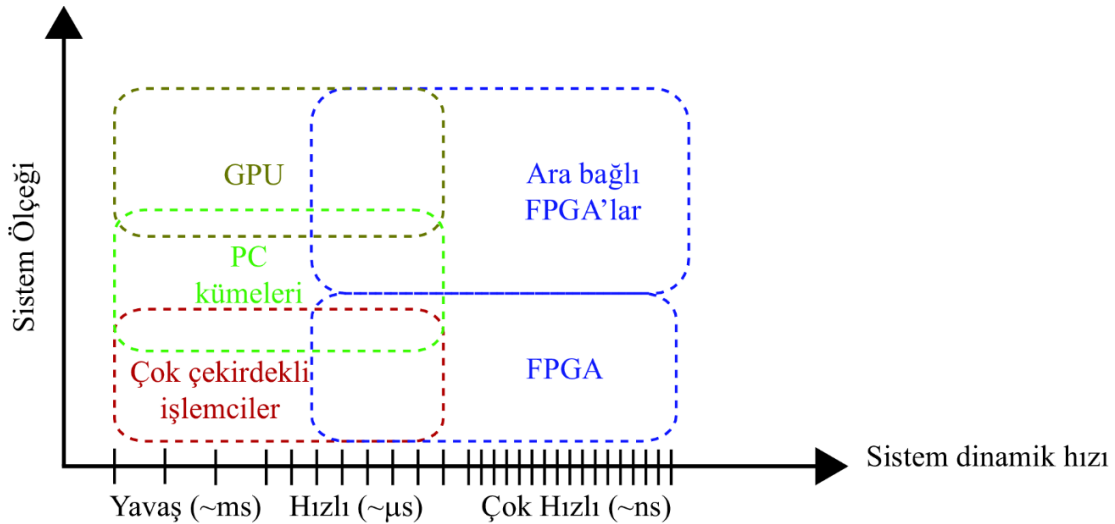
Çok çekirdekli işlemcilerin hesaplama kapasitesinin yetersiz kaldığı, büyük ölçekli ve karmaşık sistemlerin benzetiminde PC kümeleri bir diğer alternatif olarak kullanılmaktadır [9, 18]. PC kümeleri, bir pilot bilgisayar ve bir veya daha fazla uydu bilgisayar grubu, bilgisayarlar arasında bir haberleşme ağ hattı (yüksek hızlı Ethernet veya Infiniband) ve I/O'lardan oluşur. Pilot bilgisayar uydu bilgisayarları kontrol ederken, bir veya daha fazla çekirdekli işlemcilere sahip uydu bilgisayarlar paralel hesaplamaların yapıldığı düğümlerdir. PC kümelerinin avantajı ölçeklenebilir olması, dolayısıyla benzetimi yapılacak sistemin büyüklüğüne bağlı olarak ihtiyaç duyulan hesaplama kapasitesine göre uydu bilgisayarların artırılabilir olmasıdır. Bilgisayarlar arasındaki senkronizasyon ve PCI veya PCI-e veri yolundaki yüksek I/O gecikme süreleri başlıca göz önünde bulundurulması gereken hususlardır.

Bir FPGA'nın mimarisinde, programlanabilir mantık bloklar, I/O'lar, ve bunları birbirine bağlayan elektriksel bağlantı elemanları bulunur. Mantık blokları, milyonlarca mantık kapıları, çoğullayıcılardan oluşur ve birçok mantıksal işlemi yerine getirirler. FPGA'lar harici fiziksel sisteme, PCI gibi herhangi bir veri yoluna gerek duymaksızın doğrudan I/O vasıtasıyla bağlanır. Dolayısıyla, çok düşük I/O gecikme süresine sahiptirler. Bu özellikleri FPGA'ları nano-saniyeler mertebesinde hesaplama adımında benzetimler gerçekleştirmesini sağlar [10]. Bir sistemin modeli FPGA üzerinde Verilog, VHDL gibi programlama dilleri kullanarak veya kullanıcı dostu SIMULINK gibi paket programlara dayalı şematik

yöntem ile gerçekleştirilebilir. Şematik yöntemde geliştirilen model, DSP Builder, Xilinx System Generator gibi araçlar ile otomatik olarak donanım betimleme dili (HDL)ne çevrilir. Böylece, donanım betimleme dilinde uzman olmayan kullanıcılar şematik yöntemle FPGA ile benzetim gerçekleştirebilirler. Bununla birlikte, şematik yöntemin uygulamaları HDL kod yazmaya göre sınırlıdır. Ayrıca, şematik yöntemde daha çok donanım kaynağı kullanılır, dolayısıyla benzetim süresi daha uzundur. HDL kodlama tekniği ise daha esneklik ancak modelin geliştirilmesi daha zordur. Bununla birlikte, etkili bir kodlama ile donanım kaynakları optimize edilebilir. FPGA'lar göreceli olarak daha sınırlı donanım kaynaklarına sahiptirler. Bu durum, FPGA'ların gerçek sayılarla aritmetik hesaplama kapasitesini sınırlar. Özellikle, modelin derecesi arttıkça, donanım kaynaklarını etkili kullanmak daha önemli hal almaya başlar. Bunu önlemek için büyük ölçekli, karmaşık sistemlerin benzetiminde birbirine bağlı birden fazla FPGA'lar kullanılır. Bununla birlikte, bu yöntem karmaşık VHDL kodlama ve derin donanım mimarisi bilmeyi gerektirir.

GPU'lar bünyelerinde binlerce çekirdek bulunduran, iş kaynaklarını büyük oranda veri işlemeye ayıran elemanlardır. Bu özellikleri sayesinde, GPU'lar çok çekirdekli işlemcilerle göre daha üstün performans gösterirler [12]. GPU'lar daima bir işlemci ile çalışırlar. İşlemci bir uydu işlemci olabileceği gibi, sadece benzetimin yürütülmesini kontrol eden pilot işlemci gibi de çalışabilir. İşlenecek veri öncelikle işlemciden GPU'nun ana belleğine PCI veri yolu ile aktarılır. Bu transfer işlemi GPU'larda FGPA'lara göre daha uzun kurulum süresine neden olur. Çünkü, GPU ana belleği yonga üzerinde değildir. GPU'da model, C tabanlı, MATLAB ile ara yüz oluşturabilen CUDA kodlama işlemi ile gerçekleşir. Bu nedenle, kodlama işlemi FPGA'lara göre zaman yönünden daha verimlidir. GPU'lar özellikle çok sayıda durum değişkeni içeren, karmaşık sistemlerin benzetim süresini önemli oranda hızlandırır [12]. Ancak, küçük ölçekli sistemlerin benzetiminde çok çekirdekli işlemcilerle göre avantajları yüksek kurulum süresine sahip olmaları nedeniyle önemli oranda kaybolur.

DDB'de kullanılacak platformun seçimi; uygulamaya (sistem dinamikleri, sistemin büyüklüğü), platform performansına ve modelin platformda gerçekleştirileme kolaylığına bağlıdır. Şekil 3'te görüldüğü gibi, benzetim hesaplama adımı yönünden; yavaş ve hızlı dinamiklere (mili-saniye ve mikro-saniye mertebelerinde) sahip sistemlerin benzetiminde çok çekirdekli işlemciler kullanmak uygundur. Örneğin bir elektrik makinasının veya güç sisteminin gerçek zamanlı benzetimi çok çekirdekli işlemcilerle gerçekleştirilebilir. Yüksek frekanslı PWM sürücülerini içeren uygulamalar (mikro-saniye ve nano-saniye mertebelerinde) FPGA'da gerçekleştirmek daha optimumdur. Sistem büyüklüğü yönünden; küçük ve ortak ölçekteki sistemlerin benzetimi, sistem dinamiklerine bağlı olarak çok çekirdekli işlemciler, PC kümeleri veya FGPA'lar ile gerçekleştirilebilir. Sistem büyüklüğü arttıkça zaman (örneğin; yüzlerce bara içeren bir güç sistemi [13], onlarca elektrik makine ve sürücü sistemi içeren bir rüzgâr enerji sistemi gibi) GPU'lar veya yüksek hızlı dinamiklerin incelenmesi durumunda birbirine ara bağlantılı bir den fazla FPGA'lar kullanmak daha uygun olur. Sonuç olarak, yüksek hızlı dinamikler içeren sistemlerin benzetiminde FPGA'lar, çok sayıda durum değişkeni içeren yüksek dereceli sistemlerin benzetiminde GPU'lar kullanılarak, çok çekirdekli işlemcilerle göre benzetim hızı önemli oranda artırılabilir, gerçek zamanlı benzetimler gerçekleştirilebilir.



Şekil 3. Elektrikli sürme sistemlerinin DDB'sinde kullanılan platformların sistem ölçeği ve dinamik cevaplarına göre uygulama alanları.

2.2. Elektrikli Sürme Sistemleri İçin Gerçek Zamanlı DDB Teknolojileri (Real-time Hardware-in-the-loop Simulation Technologies)

Endüstri ve araştırmada kullanılan, gerçek zamanlı benzetime izin veren mevcut DDB teknoloji ürünleri Tablo 1’de listelenmiştir. Bu teknolojilerin konfigürasyonları, yukarıda belirtilen gerçek zamanlı benzetimi gerçekleştiren donanımların bir veya birkaçını içeren bir hedef donanım ile sonuçların izlenebildiği bir ana bilgisayardan oluşur. Ana bilgisayarlar Windows işletim sistemi ile çalışabilirken, hedef donanımların her biri tabloda belirtildiği üzere kendi özel işletim sistemlerinde çalışmaktadır. Sistem modelleri, ana bilgisayarda çevrim dışı geliştirilir ve platform çeşidine uygun derleyici ile hedef donanımın diline çevrilerek donanıma yüklenir. Hedef donanım bünyesindeki I/O terminalleri ile harici donanıma bağlanır. En sonunda, gerçek zamanlı benzetim hedef donanımda çalıştırılır.

RTDS, türünün ilk gerçek zamanlı benzetici örneğidir [23]. Donanımında RISC (Reduced Instruction Set Computer architecture) mikroişlemci mimarisini kullanan ve VxWorks işletim sisteminde çalışan modüler bir DDB platformudur. Her bir modül, birden çok işlemci içeren elemandan oluşur ve birbirleri ile Gigabit ethernet, TCP/IP, IEC61850 haberleşme protokolü ile haberleşir. Platform, geliştirilecek ve test edilecek sistemin gerektirdiği hesaplama yükü oranında ölçeklendirilebilir. Sistem modeli teknoloji üretici firma tarafından sunulan RSCAD modelleme aracı ile geliştirilir. Bu araç, içerisinde güç sistem elemanlarının hazır modellerinin bulunduğu ve PSS/E gibi bazı güç sistemleri benzetim programlarında geliştirilen modelleri bünyesinde dönüştürebilen bir paket programdır [23]. eMEGASIM, OPAL-RT firması tarafından geliştirilen, bünyesinde çok çekirdekli işlemci ve FPGA içeren gerçek zamanlı karma bir benzetici platformudur [24]. Hesaplama işlemi çok çekirdekli işlemci ile yapılırken FPGA kartı veri haberleşmesindeki gecikmeyi engellemek için harici donanım ile arayüz elemanı olarak kullanılır. Sistem modellemesi, Matlab/SIMULINK üzerinde geliştirilirken, modelin derlenmesi, hedef donanıma yüklenmesi ve çalıştırılması teknoloji üretici firma tarafından sunulan Rt-LAB programı ile yapılır [24]. OPAL-RT firması tarafından büyük ölçekli güç sistemleri için (azami 3 fazlı, 9000 düğüm) geliştirilen HYPERSIM, bulut bilişim tabanlı ve çok çekirdekli işlemci donanımına sahip sanal benzeticilerden oluşan gerçek zamanlı diğer bir benzetici platformudur [25]. Model, grafik kullanıcı ara yüz tabanlı teknoloji üretici firma tarafından sağlanan Hypersim paket program üzerinde geliştirilir ve sistemin gerektirdiği hesaplama gücü kadar çekirdek sanal olarak kullanılır. Benzer karma donanım mimarisine sahip diğer gerçek zamanlı benzetim ve test platformu Speedgoat’dır [26]. Bu platformda FPGA’lar, eMEGASIM’den farklı olarak SIMULINK HDL kod üretici yardımıyla programlanarak benzetimde işlemci olarak kullanılabilir. dSPACE, özellikle endüstriyel ve otomotiv kontrol sistemlerinin geliştirilmesinde ve testinde sıklıkla kullanılan bir DDB platformudur [27]. Bu platform, modelin kişisel bilgisayarlar üzerinde SIMULINK, State-flow programlar ile geliştirilmesine ve gerçek zamanlı DDB’sine imkân tanır. Daha çok güç elektroniği kontrol sistemleri için geliştirilmiş Typhoon, işlemci olarak FPGA kullanan, gerçek zamanlı benzetim gerçekleştirebilen bir DDB platformudur [28]. Sistem modeli, teknoloji üretici firma tarafından sağlanan grafik kullanıcı arayüz tabanlı bir paket program olan Schematic üzerinde geliştirilir ve Matlab/SIMULINK ile derlenerek hedef donanıma yüklenir. Bu platform, FPGA kart sayesinde mikro ve nano saniye mertebesi hesap adımlarında gerçek zamanlı benzetimler gerçekleyebilir. Kişisel bilgisayarlar kullanılarak gerçek zamanlı DDB’ye imkân tanıyan diğer platformlar xPC [29] ve ADI rtX’dir [30]. Sistem modelleri SIMULINK, State-flow üzerinde geliştirilir, Real-time Workshop ile derlenerek hedef donanıma yüklenir ve X-PC target Linux veya sistem çekirdeği (kernel) ile gerçek zamanlı çözülür.

Tablo 1. Elektrikli sürme sistemleri için gerçek zamanlı DDB teknolojileri [2]

Teknoloji Adı	Donanım Mimarisi	İşletim Sistemi	Haberleşme Protokolü	Harici Donanım ile Arayüz	Modelleme Aracı	Uygulama Alanları
RTDS [23]	RISC	VxWorks	Gigabit ethernet, TCP/IP, IEC61850	Analog ve sayısal I/O'lar	RSCAD	Güç sistemleri, güç elektroniği ve kontrol sistemleri
eMEGASIM [24]	Çok çekirdekli işlemci ve FPGA	Linux tabanlı RedHat	Ortak bellek, Gigabit ethernet, UDP/IP, Infiniband, Dophin, IEC61850	FPGA tabanlı analog ve sayısal I/O'lar	Matlab/SIMULINK	Güç sistemleri, güç elektroniği, otomotiv, kontrol sistemleri
HYPERSIM [25]	Çok çekirdekli işlemci ve FPGA	Linux tabanlı Hypersim	Gigabit ethernet, IEC61850	PCI-e	Hypersim	Güç sistemleri, güç elektroniği ve kontrol sistemleri
Speedgoat [26]	Çok çekirdekli işlemci ve FPGA	Gerçek zamanlı sistem çekirdeği (kernel)	Profibus, Ethernet/IP, CAN, UDP, MIL-STD-1553	FPGA tabanlı analog ve sayısal I/O'lar	Matlab/SIMULINK, SIMULINK Real-time, SIMULINK HDL coder	Endüstriyel kontrol, güç elektroniği, otomotiv
dSPACE [27]	Mikroişlemci	QNX ROS	Gigabit ethernet, dSPACE protokol	PCI-e	SIMULINK, Stateflow, AUTOSAR	Endüstriyel kontrol, güç elektroniği, otomotiv, uzay
Typhoon [28]	FPGA	FPGA	IEEE 1284C, Ethernet RJ45	FPGA tabanlı analog ve sayısal I/Os	Typhoon schematic	Güç elektroniği kontrol sistemleri
xPC Target [29]	Mikroişlemci ve FPGA	Linux / Gerçek zamanlı sistem çekirdeği (kernel)	PC104, TCP/IP UDP/IP, CAN, J1939, ARINC429, MIL-STD-1553	PCI, PCI-e, PMC,	SIMULINK, Stateflow, SIMULINK Coder, HDL coder	Kontrol sistemleri
ADI rtX [30]	Mikroişlemci	QNX TROS	TCP/IP UDP/IP, CAN, ARINC429, MIL-STD-1553, RS-232, RS-422	PCI, PXI, VME, DIOS	ADvantageDE, ADvantageVI	Deniz ve havacılık güç sistemleri, uçak ve gemi benzetimleri

3. DURUM ÇALIŞMALARINI (CASE STUDIES)

Bu bölümde örnek bir elektrikli sürme sisteminin gerçek zamanlı DDB'si eMEGASIM OP5600 platformu üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bu platform, 3.0 GHz'de çalışan 8 adet Intel işlemci çekirdeği ve 256 analog ve dijital I/O'ya sahip bir SPARTAN-3 FPGA kart içermektedir. Sürme sistemi olarak bir KMSM sürücüsü seçilmiştir. Motor kontrol devresinde, literatürde kullanılan alan yönlendirmeli bir vektör kontrolü gerçekleştirilmiştir. Vektör kontrol devresi, hızlı dinamik cevabına sahip olmasına rağmen hesaplama yönünden karmaşıktır ve ardışık işlem çevrimlerine dayanan programlar ile gerçek zamanlı benzetimi gerçekleştirilememektedir [31]. Aşağıda, bu kontrol sisteminin paralel işleme imkân tanıyan karma OP5600 platformunda gerçek zamanlı benzetimi gösterilecektir.

3.1. Vektör Kontrollü KMSM Sürücü Modeli (Vector Controlled PMSM Drive Model)

Senkron hızda dönen rotor referans çerçevesinde KMSM denklemleri aşağıdaki gibi yazılabilir [32]:

$$v_{sd} = R_s \cdot i_{ds} + L_{ds} \frac{d}{dt} i_{ds} - \omega_e \cdot L_{qs} \cdot i_{qs}, \quad 1$$

$$v_{sq} = R_s \cdot i_{qs} + L_{qs} \frac{d}{dt} i_{qs} + \omega_e \cdot (L_{ds} \cdot i_{ds} + \lambda_{fd}), \quad 2$$

$$T_e = \frac{3}{2} P (\lambda_{fd} \cdot i_{qs} + (L_{ds} - L_q) \cdot i_{ds} \cdot i_{qs}), \quad 3$$

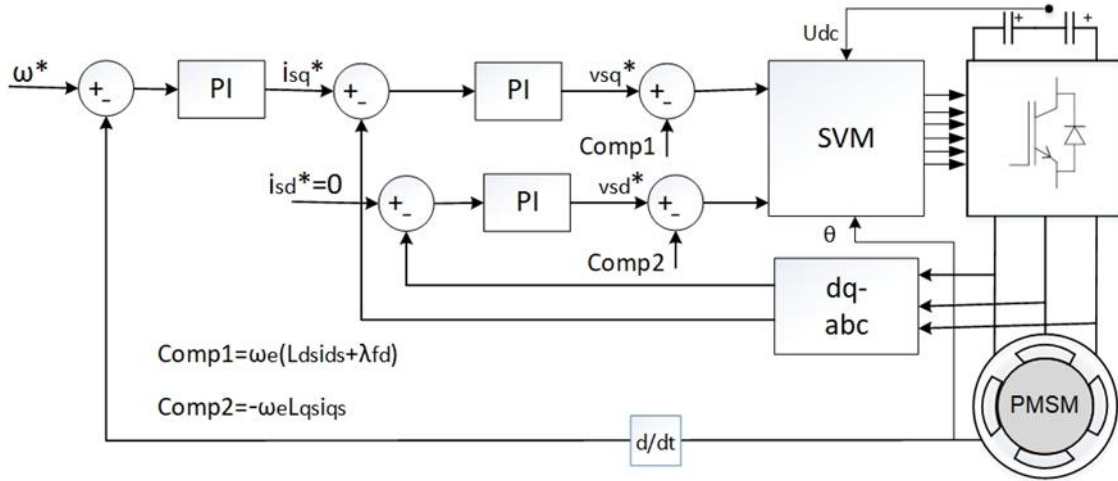
$$\frac{d}{dt} \omega_m = (T_e - T_L - B \cdot \omega_m) / J, \quad 4$$

$$\omega_e = P \cdot \omega_m = \frac{d}{dt} \theta_e.$$

5

Bu denklemlerde; d ve q indisleri: d-eksen ve q-eksen bileşenlerini, vsd, vsq: stator gerilimlerini, ids, iqs: stator akımlarını, Rs: stator sargısı direncini, Lds, Lqs: stator kaçak endüktanslarını; P: çift kutup sayısını, ω_e , ω_m : rotorun elektriksel ve mekanik hızlarını, λ_{fd} : rotor kalıcı mıknatıs akısını, T_e , T_L : üretilen elektromagnetik momenti ve yük momentini, θ_e : rotorun elektriksel pozisyonunu ifade eder.

Gerçek zamanlı benzetimi yapılacak sistem, üç fazlı bir köprü doğrultucu, bir DC kıyıcı ve üç fazlı bir evirici ile bir KMSM'den oluşmaktadır. Sistem modeli Matlab ve SIMULINK ortamında geliştirilmiştir. 3 fazlı, 3 BG gücünde, 4 kutuplu bir KMSM modeli (1)-(5), bir Matlab fonksiyonu ile SIMULINK ortamında gerçekleştirilmiştir. Doğrultucu, kıyıcı ve evirici olarak SIMULINK kütüphanesinde bulunan hazır makro modeller kullanılmıştır. Benzetimde, anahtarlama devrelerinin ortalama modeli yerine detaylı modelleri seçilmiştir. Motor kontrol devresi Şekil 4'te verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere, kontrol devresi kapalı çevrim bir hız denetleyicisi ile d ve q eksen referans gerilimlerinin belirlendiği bir vektörel denetleyiciden oluşur. Hız denetleyicisi, referans ve gerçek hız değerlerinin karşılaştırıldığı bir karşılaştırıcı ile hız hatasının beslediği ve referans moment değerinin hesaplandığı klasik bir PI kontrolöründen oluşur. Vektörel denetleyicisi ise, referans abc gerilimlerinin hesaplandığı bir gerilim regülatörü ile anahtar kapı tetikleme sinyallerinin üretildiği uzay vektör darbe genişlik modülasyon bloğunu içerir.



Şekil 4. Gerçek zamanlı benzetimi yapılan KMSM sürücüsü kontrol devresi blok diyagramı

3.2. Durum Çalışmaları, Bulgular ve Tartışmalar (Case Studies, Findings and Discussion)

Gerçek zamanlı benzetimde, sabit bir zaman adımı kullanılır ve benzetim süresince ayrık zaman dilimlerinin her birinde sistem durum değişkenleri çözülerek, I/O terminalleri üzerinden harici donanım ile veri alışverişi gerçekleştirilir. Gerçek zaman davranışını ihmal etmemek için bu zamanın belirlenmesi önemlidir. Zaman adımı belirleme işleminde, veri alış-veriş ile model çözümü için gerekli sürenin yanında işlemcinin herhangi bir işlevi yerine getirmediği bir boş sürenin de bulunması gerekmektedir. Dolayısıyla, ayrık zaman süresi üç bileşenin toplamına eşit olmalıdır: (i) veri alış-veriş süresi, (ii) model çözüm süresi, (iii) boş (âtlı) süre. Benzetim zaman adımı artırıldıkça, gerçek zamanlı benzetim için daha az hesaplama gücüne ihtiyaç duyulurken zamansal çözünürlük dolayısıyla sistem çözümünün doğruluğu azalır. Diğer yandan, küçük benzetim zaman adımlarında sistem çözümünün doğruluğu artarken benzetimin her bir ayrık zaman diliminde sistem çözümü için daha fazla hesaplama gücüne ihtiyaç duyulur.

Öncelikle evirici anahtarlama frekansı belirlenmiştir. Anahtarlama frekansı seçiminde stator akımları toplam harmonik bozulması (THD) değerlendirme ölçütü olarak kullanılmıştır ve farklı anahtarlama frekans değerleri için OP5600 platformunda sistemin benzetimi gerçekleştirilmiştir. Stator akımları yüzde THD değerleri ve gerçek zamanlı benzetim davranışını gerçekleştirme durumu Tablo 2'de özetlenmiştir. 5 μ s benzetim zaman adımında, seçilen tüm anahtarlama değerlerinde gerçek zamanlı benzetim

gerçekleştirilememiştir. Örneğin, Şekil 5.a'da 5 μ s, 20 kHz anahtarlama frekans değerlerinde hedef donanım benzetim hesaplama değerleri gösterilmiştir. Toplam 441 s benzetim süresi boyunca, toplam 63 defa gerçek zaman benzetim ihlal edilmiş, çözüm süresi seçilen hesaplama adımından fazla sürmüş ve veri kaybı yaşanmıştır. 5 μ s, 20 kHz anahtarlama frekansı durumunda benzetici platformun gerçek zamanlı benzetimi için azami 5.07 μ s süreye ihtiyaç duyulmuştur. Bununla birlikte, 10 μ s zaman aralığında seçilen tüm anahtarlama frekans değerlerinde gerçek zamanlı benzetim gerçekleştirilmiştir. Örneğin, Şekil 5.b'de verildiği üzere, 10 μ s, 20 kHz anahtarlama frekansı için benzetici platformu işlemci çekirdeğin, belirlenen zaman adımında gerçek zaman benzetim süreçlerini tamamlayabilmektedir. Burada, anahtarlama frekans seçiminin hesaplama yüküne etkisinin benzetim zaman adımına göre daha az olduğu sonucuna varılmıştır. Sonuç olarak, ele alınan KMSM sürücü sisteminin zaman sabiti ve evirici anahtarlama frekansı dikkate alınarak, gerçek zamanlı benzetim adımı 10 μ s seçilmiştir. Bu zaman çözünürlüğü, 10 kHz olarak seçilen evirici anahtarlama frekansı dinamiklerini analiz etme için oldukça yeterli bir süredir.

Tablo 2. Benzetim adımı ve evirici anahtarlama frekansına göre stator akımları THD'si ve gerçek zamanlı benzetim gerçekleşme durumu

Benzetim zaman adımı	5 μ s				10 μ s			
	4	8	10	20	4	8	10	20
Evirici anahtarlama frekansı (kHz)	4	8	10	20	4	8	10	20
Stator akım THD (%)	19.17	12.14	10.64	10.54	23.36	13.55	12.94	12.91
Gerçek zamanlı benzetim durumu	Hayır	Hayır	Hayır	Hayır	Evet	Evet	Evet	Evet

KMSM sürücü modeli Matlab ve SIMULINK ortamında kurulup hedef benzetici OP5600 yüklenmeden önce platformdaki FPGA kartın biçimlendirilmesi ve dolayısıyla I/O'ların etkinleştirilmesi gerekir. Bu işlem teknoloji üretici firma tarafından sağlanan [18] ve SIMULINK kütüphanesinde bulunan Şekil 6'da verilen "OpCtrl makro modeli" ile gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen model, teknoloji üretici firma tarafından sağlanan sunulan Rt-LAB programı ile derlenerek hedef donanım OP5600 üzerine yüklenmiş ve bu program vasıtasıyla gerçek zamanlı benzetim başlatılmıştır. Benzetimde, sürücü sistemi öncelikle boşa çalıştırılmıştır. Sistem kararlı hale ulaştıktan sonra $t=0.5$ saniyesinde motora tam yük uygulanmıştır. $t=1$ saniyesinde motor yarı yükte yüklenmiştir. Tüm durumlarda nominal hız (300 d/d) referans olarak girilmiştir. Stator akımları, KMSM moment ve hız cevapları ile DC bara gerilimi hedef donanım üzerinde takip edilmiş ve gerçek zamanlı benzetimin ilk 2 saniyesi boyunca gerçek zamanlı sonuçlar kaydedilmiştir. Kaydedilen sonuçlar Şekil 7-10'da gösterilmiştir.

Monitoring

Model: machine $T_s=5.0E-6[s]$ $T=441.975794[s]$ Number of overruns=63

Probes	<< Info	
	Usage [%]	Mean
machine $T_s=5.0E-6[s]$	41.98%	
Number of Overruns		63
SM_Drive $T_s=4.999999874E-6[s]$	41.98%	dt= 2.37 [us]
New data acquisition	0.51%	dt= 0.05 [us]
Major computation time	30.19%	dt= 1.71 [us]
Minor computation time	1.27%	dt= 0.11 [us]
Execution cycle	41.98%	dt= 2.37 [us]
Total step size	100.0%	dt= 5.07 [us]
Total idle	52.35%	dt= 2.76 [us]

a)

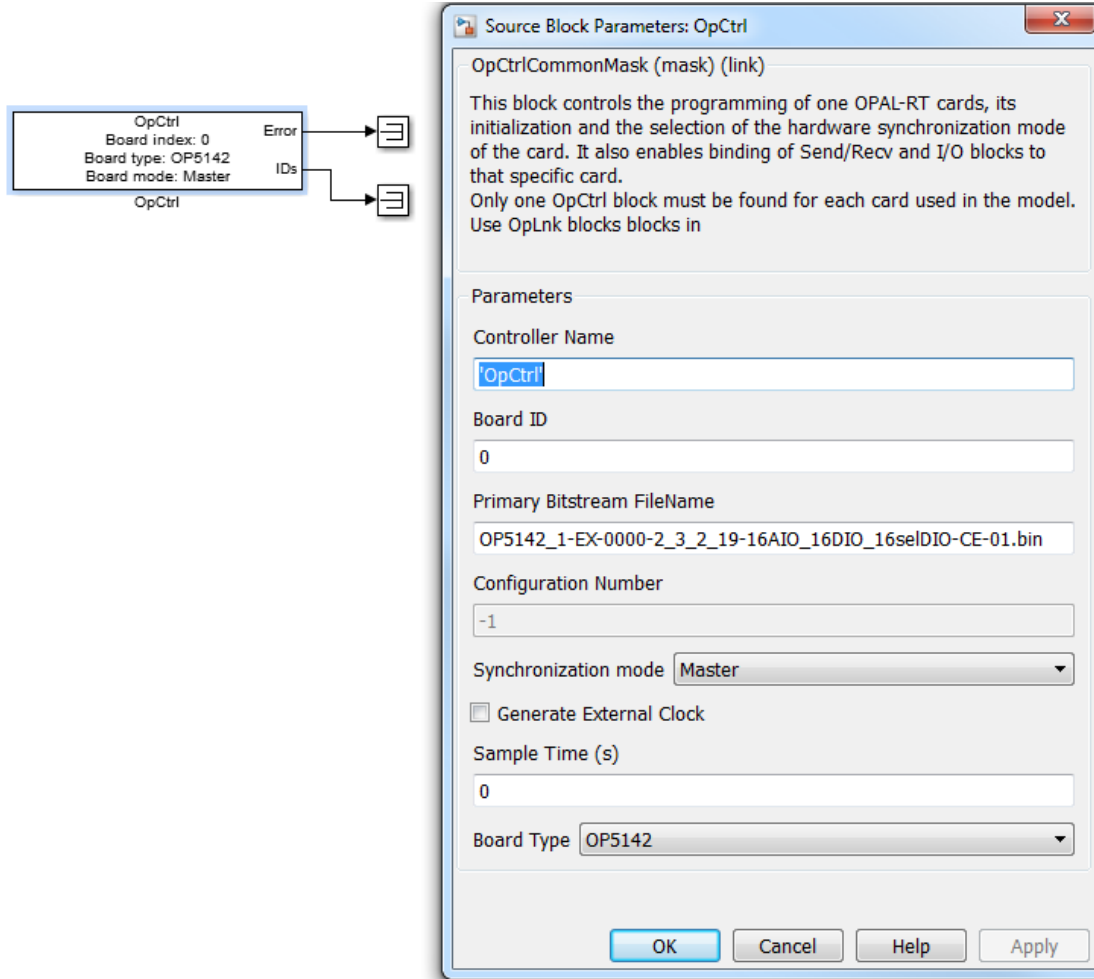
Monitoring

Model: machine $T_s=1.0E-5[s]$ $T=463.46745[s]$ Number of overruns=0

Probes	<< Info	
	Usage [%]	Mean
machine $T_s=1.0E-5[s]$	22.43%	
Number of Overruns		0
SM_Drive $T_s=9.999999747E-6[s]$	22.43%	dt= 2.24 [us]
New data acquisition	0.26%	dt= 0.03 [us]
Major computation time	16.03%	dt= 1.60 [us]
Minor computation time	1.15%	dt= 0.12 [us]
Execution cycle	22.43%	dt= 2.24 [us]
Total step size	100.0%	dt= 10.00 [us]
Total idle	74.69%	dt= 7.47 [us]

b)

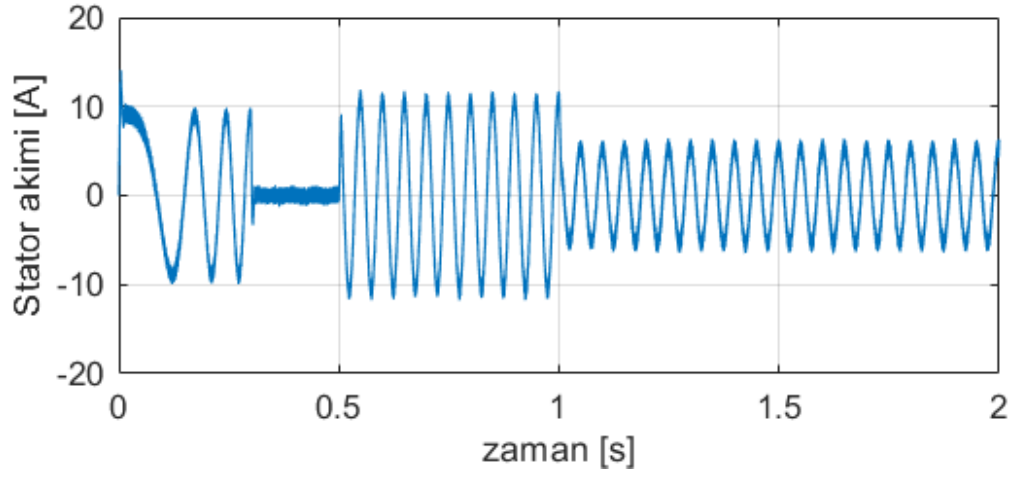
Şekil 5. Bir benzetim zaman adımında gerçek zamanlı benzetim süreçlerinin bir işlemci çekirdeği kaynağını kullanma süreleri (a) $5 \mu s$ benzetim adımı, (b) $10 \mu s$ benzetim adımı



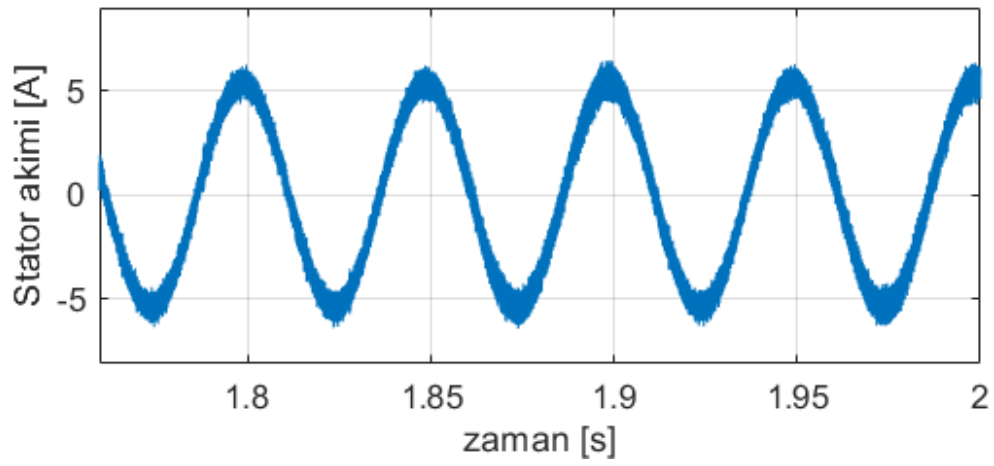
Şekil 6. OP5600 platformu FPGA I/O biçimlendirme bloğu

Şekil 8’de görüldüğü üzere, denetleyicinin dinamik moment cevabı, referans momenti uygun şekilde takip ediyor. Burada, ilk 0.5 s aralığında motor yüksüz çalışmakta, $t=0.5$ s anında tam yük momenti referans olarak uygulanmaktadır. Seçilen örnekleme zamanında ~ 1.5 Nm bir moment dalgalanması ölçüldü. Moment değişimlerinde hız cevabında küçük bir dalgalanma gözlenmekle birlikte, hız ani bir şekilde dengelenmektedir. Motorun yol verme ve moment değişimlerine karşı denetleyici DC bara gerilimini uygun bir şekilde düzenlemektedir. Gerçek zamanlı hız dinamik cevabı Şekil 9’daki gibi elde edilmiştir. $t=0.5$ s ve $t=1$ s anlarında sırasıyla uygulanan tam yük ve yarı yük moment değerlerinde motor hızında ani salınımlar oluşmaktadır. Bu salınımlar, hız denetleyicisi katsayılarının optimize edilmesi ile azaltılabilir.

Bu çalışmada, gerçek zamanlı benzetim 3.0 GHz’de çalışan 1 adet Intel işlemci çekirdeğinde yapılmıştır. Vektör kontrollü bir KMSM sürücü modelinin gerçek zamanlı benzetimi için en az 5.07 μ s süreye ihtiyaç duyulmuştur. 10 μ s benzetim adımında, 1 adet işlemci çekirdeği kaynağının Şekil 5.b’de görüldüğü üzere, yaklaşık %26 oranı kullanılmaktadır. Bu süre elektrik sürücü uygulamaları için yeterli olmakla birlikte, daha yüksek anahtarlamalı frekans (örneğin 100 kHz değerleri vb.) uygulamalarında, örnekleme zamanını daha da düşürmek için sistem modeli, hedef donanımın sahip olduğu 8 işlemci çekirdeği paralel olarak kullanılabilir. Bunun için sistem modeli durum değişkenleri ve içerdikleri anahtarlama elemanlarına göre 8 parçaya bölünerek optimize edilebilir. Optimize işlemi, şekil 5’te gösterildiği gibi her bir parçanın işlemci çekirdeğinde ne kadar kaynak kullandığı belirlenerek yapılabilir. Ayrıca, kullanılan benzetici platformunda FPGA kartı sistem çözümü yerine I/O biçimlendirilmesi için kullanmakta olup, teknoloji firma tarafından sunulan derleyici ile sistem modeli HDL’ye çevrilememektedir. Sistem modelinin FPGA ile çözülmesi durumunda çok daha düşük örnekleme zamanlarında çalışılabilir.

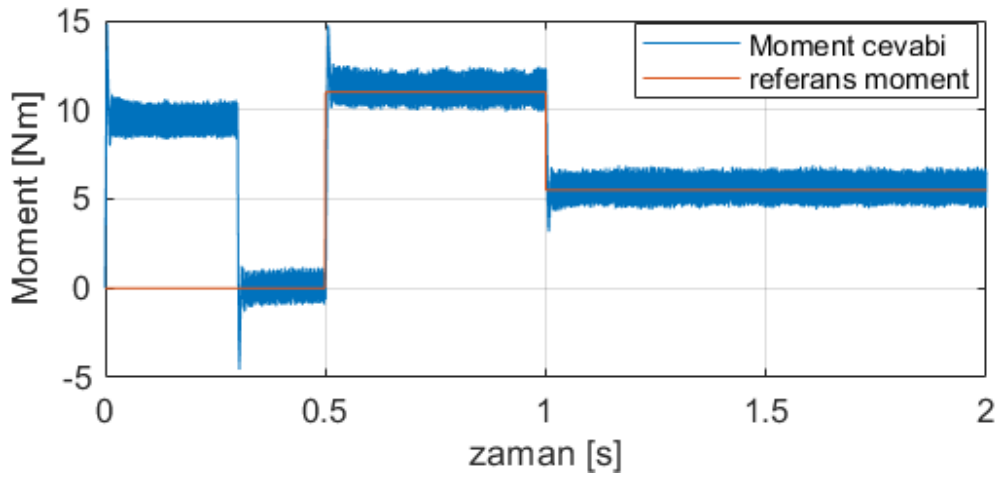


a)

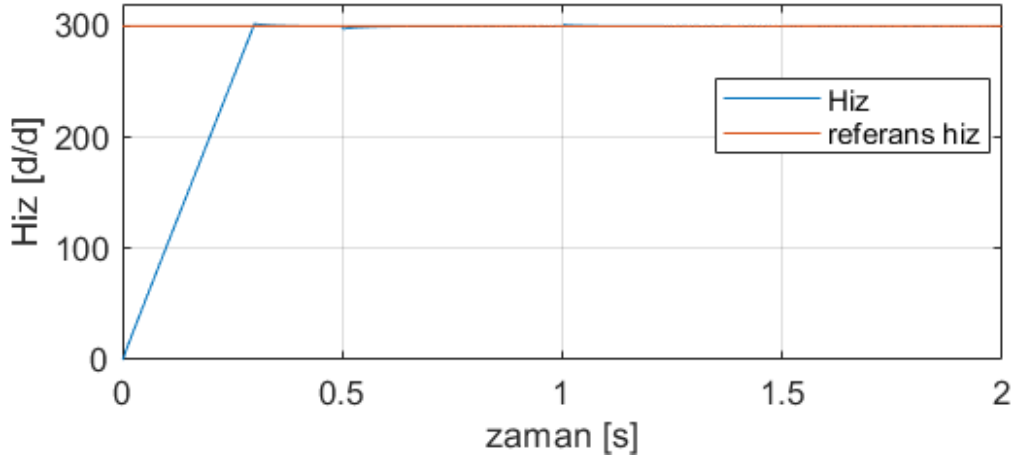


b)

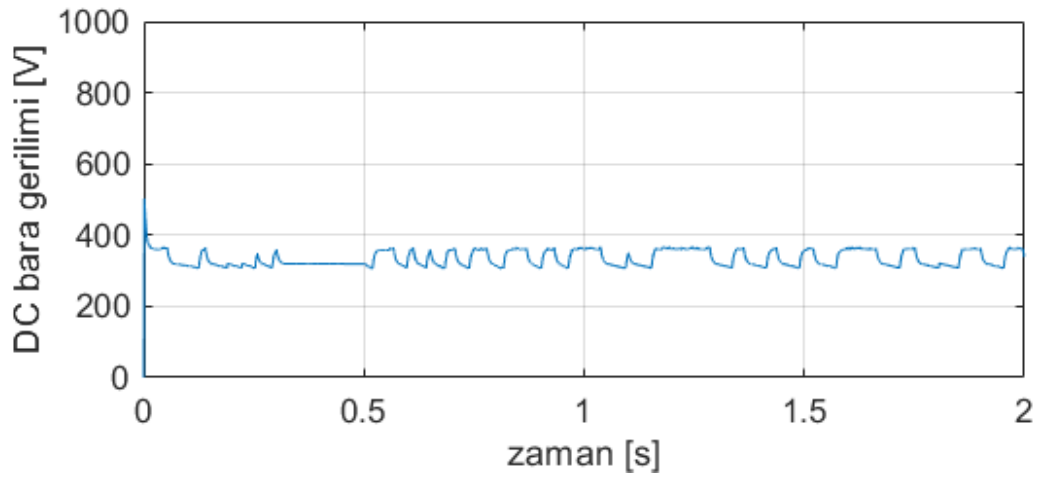
Şekil 7. KMSM stator akımının gerçek zaman davranışı (a) geçici ve kararlı hal cevapları, (b) kararlı hal cevabı



Şekil 8. KMSM momenti gerçek zaman davranışı



Şekil 9. KMSM hız gerçek zaman davranışı



Şekil 10. DC bara gerilimi gerçek zaman davranışı

4. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada, elektrikli sürme sistemlerinin DDB'sinde kullanılan gerçek zamanlı benzetim donanımları ve bu donanımları içeren mevcut teknoloji platformları detaylı incelenmiş, sistem ölçeği ve dinamik hızına göre uygun platform önerilerinde bulunulmuştur. Örnek bir KMSM sürücü sisteminin gerçek zamanlı benzetimi çok çekirdekli işlemci ve FPGA içeren karma bir benzetici platformunda gerçekleştirilmiş, gerçek zamanlı benzetimde karşılaşılan meseleler tartışılmıştır. Elde edilen sonuçlar, birkaç mikro saniye örnekleme adımlı elektrikli sürme sistemlerinin gerçek zamanlı DDB'sinin paralel işleme izin veren çok çekirdekli işlemcilerle gerçekleştirilebileceğini göstermiştir. Birkaç yüz kHz anahtarlamalı frekansta çalışan sürme sistemlerinin gerçek zamanlı DDB'si için ise FPGA kullanılması gerekmektedir. Donanım betimleme dilinde uzman olmayan kullanıcılar için bu tür uygulamalarda, sistem modelini SIMULINK HDL kod üretici gibi otomatik donanım betimleme diline çevirerek FPGA ile gerçek zamanlı benzetim gerçekleştirebilen teknoloji ürünler kullanması önerilebilir. Yavaş (mili saniye) ve hızlı (mikro saniye) sistem dinamiklerine sahip, çok büyük ölçekli sistemlerin (güç sistemine bağlı rüzgâr çiftlikleri uygulaması, vb) gerçek zamanlı DDB için ise GPU'lar veya birden fazla FPGA'lar önerilmektedir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışma University College Cork, Marine and Renewable Energy Centre Elektrik Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Laboratuvar altyapısını bu araştırmada kullanılmasına izin verdikleri için University College Cork'a teşekkürlerimizi sunarız.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] E. Yaylacı, İ. Yazıcı, Otonom bir Rüzgâr Enerji Sistemi için Örnek Test Düzenineğinin Gerçeklenmesi, Gazi Üniv. Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji, 7 (1), 175-183, 2019.
- [2] M.D.O. Faruque, v.d., Real-time simulation technologies for power systems design, testing, and analysis, IEEE Power and Energy Technology Systems Journal 2(2), 63-73, 2015.
- [3] Z. Doğru, Döngüde Donanımsal Benzetim ve Gerçek Zamanlı Gömülü Sistemler, Gazi Üniv. Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2012.
- [4] W. Ren, v.d., Interfacing Issues in Real-Time Digital Simulators, IEEE Trans. on Power Delivery, 26(2), 1221-1230, 2011.
- [5] A. Sarıkan ve M. T. Aydemir, Gerçek Zamanlı Benzetim ve Kapalı Döngü İçerisinde Donanım Desteği: Uygulamalar ve Sınırlamalar, Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der., 24(3), 517-524, 2009.
- [6] S. Mojlish, N. Erdogan, D. Levine, and A. Davoudi, Review of Hardware Platforms for Real-Time Simulation of Electric Machines, IEEE Trans. on Transportation Electrification, 3(1), 130-146, 2017.
- [7] S. Tezcan, Rüzgâr Santrallerinin Modellenmesi ve Rüzgâr Santrallerinin İletim Sistemi Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi, Gazi Üniv. Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji, 5 (3), 197-212, 2017.
- [8] R. Champagne, L. A. Dessaint, H. Fortin-Blanchette, and G. Sybille, Analysis and validation of a real-time AC drive simulator, IEEE Trans. on Power Electronics, 19(2), 336-345, 2004.
- [9] LF. Pak and V. Dinavahi, Real-time simulation of a wind energy system based on the doubly-fed induction generator, IEEE Trans. on Power Systems 24(3), 1301-1309, 2009.
- [10] N.R. Tavana and V. Dinavahi, A general framework for FPGA-based real-time emulation of electrical machines for HIL applications, IEEE Trans. on Industrial Electronics 62(4), 2041-2053, 2015.
- [11] M. Peker, O. Özkaraca, Büyük ölçekli veri setleri için GPU hızlandırmalı melez bir GA-SVM: Cu-GA-SVM, Gazi Üniv. Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji, 6 (3), 581-591, 2018.
- [12] Z. Zhou and V. Dinavahi, Parallel massive-thread electromagnetic transient simulation on GPU, IEEE Trans. on Power Delivery 29(3), 1045-1053, 2014.
- [13] M. Yeşilbudak, S. Ermiş, R. Bayındır, Farklı Baralara Sahip Güç Sistemlerinde Yük Akışı Analiz Metotlarının Karşılaştırılması, Gazi Üniv. Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji, 5 (3), 237-246, 2017.
- [14] S. Usenmez, R. A. Dilan, M. Dolen, & A.B. Koku, Real-time hardware-in-the-loop simulation of electrical machine systems using FPGAs, In IEEE International Conference on Electrical Machines and Systems, pp. 1-6, November, 2009.
- [15] N. Erdogan, T. Assaf, R. Grisel, & M. Aubourg, An accurate 3-phase induction machine model including skin effect and saturations for transient studies, In IEEE Sixth International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). Vol. 2, 646-649, 2003.
- [16] İ. Çelik, C. Yıldız, M. Şekkeli, Rüzgâr Enerji Santrali kurulumunda rüzgâr türbinlerinin mikro yerleşimi için bir optimizasyon modeli, Gazi Üniv. Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji, 6 (4), 898-908, 2018.
- [17] E. Duman, E. Akın, EEBM Eğitiminde Döngüde Donanımsal Benzetim Tekniğinin Kullanımı, Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Mühendislikleri Eğitimi 2. Ulusal Sempozyumu, Samsun, 1-5, 2005.

- [18] X. Guillaud v.d., Applications of real-time simulation technologies in power and energy systems, IEEE Power and Energy Technology Systems Journal 2(3), 103-115, 2015.
- [19] V. Jalili-Marandi, L. F. Pak, & V. Dinavahi, Real-time simulation of grid-connected wind farms using physical aggregation, IEEE Trans. on Industrial Electronics, 57(9), 3010-3021, 2010.
- [20] S. Abourida, C. Dufour, and J. Bélanger, Real-Time and Hardware-In-The-Loop Simulation of Electric Drives and Power Electronics: Process, problems and solutions, In Proceedings of the International Power Electronics Conference (IPEC-Niigata 2005), Niigata, Japan. 2005.
- [21] S. Abourida, v.d. Hardware-in-the-loop simulation of finite-element based motor drives with RT-LAB and JMAG, in IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Vol. 3, 2006.
- [22] P. G. McLaren, R. Kuffel, R. Wierckx, J. Giesbrecht, & L. Arendt, A real time digital simulator for testing relays, IEEE Trans. on Power Delivery, 7(1), 207-213, 1992.
- [23] RTDS Tech. Inc. Real time digital power system simulation. <https://www.rtds.com>. Erişim tarihi Eylül, 21, 2019.
- [24] OPAL-RT Inc. RT-LAB: Distributed Real-Time platform v11.2.2.108. <https://www.opal-rt.com>. Erişim tarihi Eylül, 21, 2019.
- [25] OPAL-RT Inc. Hypersim real-time simulation. <https://www.opal-rt.com/systems-hypersim>. Erişim tarihi Eylül, 21, 2019.
- [26] Speedgoat GmbH, Real-time simulation and testing, <https://www.speedgoat.com/> 2019. Erişim tarihi Eylül, 21, 2019.
- [27] dSPACE GmbH. dSPACE manual. <https://www.dspace.com/en>. Erişim tarihi Eylül, 21, 2019.
- [28] Typhoon HIL Inc. Typhoon HIL real-time simulator. <https://www.typhoon-hil.com>. Erişim tarihi Eylül, 21, 2019.
- [29] MathWorks Inc. xPC Target for use with real-time workshop. https://www.mathworks.com/tagteam/37937_xpc_target_selecting_hardware_guide.pdf. Erişim tarihi Eylül, 21, 2019.
- [30] ADI Applied Dynamics International. ADI rTX. <https://www.adi.com>. Erişim tarihi Eylül, 21, 2019.
- [31] A.A. Adam, K. Gulez, & N. Erdogan, Minimum torque ripple algorithm with fuzzy logic controller for DTC of PMSM, In International Conference on Intelligent Computing, pp. 511-521, 2007.
- [32] D. Uygun, Y. Çetinçeviz, Yüzey Yerleştirmeli Kalıcı Mıknatıslı Senkron Generatörlerin Tutma Torkunun Azaltılması İçin Stator Yapılandırması, Gazi Üniv. Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji, 6 (3), 605-620, 2018.

Experimental Investigation of Performance Combustion and Emission Characteristics in an HCCI Engine Fuelled Isopropanol and Heptane Fuel Mixtures

 Alper CALAM^{1,*} , Bilal AYDOĞAN² 
¹Gazi University, Technical Sciences Vocational High School, 06374, Ostim/ANKARA

²Burdur Mehmet Akif Ersoy University, Technical Sciences Vocational High School, 15100, Merkez/BURDUR

Graphical/Tabular Abstract

Article Info:

Research article

Received: 11/08/2019

Revision: 26/09/2019

Accepted: 06/10/2019

Highlights

- Performance and emission characteristics were investigated
- Test fuels were delivered to the intake port.

Keywords

HCCI
 Low Temperature Combustion
 Engine Performance
 Exhaust Emissions
 Combustion

In this study, the effect of isopropanol on combustion and exhaust emissions was investigated experimentally in a single cylinder HCCI engine with port injection system. The experiments were carried out at 1000 min⁻¹ engine speed and 60 °C intake air temperature.

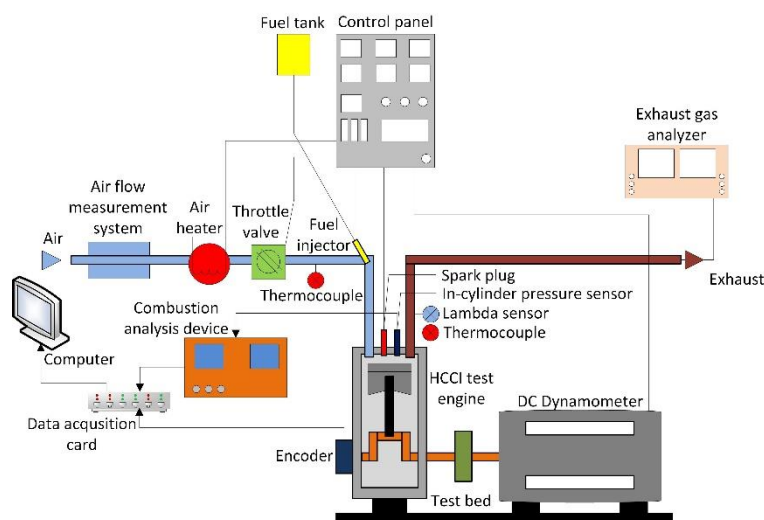


Figure A. The schematic view of the test bed.

Purpose: In this study, the effects of isopropanol fuel on HCCI combustion were investigated. For this purpose, a mixture with the reference fuel (n-heptane) was provided. Combustion, performance and exhaust emissions were investigated.

Theory and Methods: The experiments were carried out at 1000 min⁻¹ engine speed and 60 °C intake air temperature. Fuel mixtures were delivered to the intake port by using the port injection system. The amount of fuel to be injected was adjusted by pulse width of the injector that was controlled by the potentiometer on the control panel. The injection was controlled electronically and air/fuel ratio was kept constant.

Results: Isopropanol fuel enabled the HCCI combustion to be controlled. However, CO and HC emissions deteriorated by using the isopropanol.

Conclusion: The effect of isopropanol on combustion and exhaust emissions was investigated experimentally in a single cylinder HCCI engine with port injection system. The maximum indicated thermal efficiency was obtained as 43.27 % at 2.4 lambda with ip25 fuel. The use of ip25 and ip50 fuels compared to n-heptane, the CO emissions worsened by 22.7% and 62.1%, respectively. However, HC emissions increased by 8.8% and 12%, respectively. The addition of isopropanol to the n-heptane fuel resulted in reduced pressure rise rate. Thus, spontaneous HCCI combustion is controlled.



İzopropanol ve Heptan Karışım Yakıtları Kullanılan HCCI Bir Motorda Performans Yanma ve Emisyon Karakteristiklerinin Deneysel İncelenmesi

Alper CALAM^{1,*} Bilal AYDOĞAN²

¹Gazi Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, 06374, Ostim/ANKARA

²Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, 15100, Merkez/BURDUR

Öz

Bu çalışmada tek silindirli, port enjeksiyon sistemine sahip HCCI bir motorda, izopropanolün yanma ve egzoz emisyonlarına etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Deneyler 1000 min⁻¹ motor hızında ve 60 °C emme havası giriş sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Çalışmada saf n-heptan ve n-heptan izopropanol yakıt karışımları (ip25 ve ip50) kullanılmıştır. Silindir içi basınç, ısı dağılımı, yanma başlangıcı, yanma süresi, basınç artış oranı ve egzoz emisyonları incelenmiştir. Tüm test yakıtlarında da karışımın fakirleşmesiyle silindir içi basınç ve ısı dağılımının azaldığı tespit edilmiştir. N-heptan yakıtına izopropanol ilavesi yanma başlangıcının gecikmeye alınmasına ve yanma süresinin uzamasına neden olmuştur. En yüksek indike termik verim ip25 yakıtı kullanımında HFK'nın 2,4 oldu şartlarda % 43,27 olarak tespit edilmiştir. İp25 ve ip50 yakıtları kullanımında n-heptan yakıtına göre CO emisyonları sırası ile %22,7 ve %62,1 oranında kötüleşmiştir. Bununla birlikte HC emisyonları sırası ile %8,8 ve %12 oranında artış göstermiştir. N-heptan yakıtına izopropanol ilavesi, basınç artış oranının azalmasını sağlamıştır. Böylece kendiliğinden gerçekleşen HCCI yanması kontrol altına alınmıştır.

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
 Başvuru: 11/08/2019
 Düzeltme: 26/09/2019
 Kabul: 06/10/2019

Anahtar Kelimeler

HCCI
 Düşük Sıcaklık Yanması
 Motor Performansı
 Egzoz Emisyonları
 Yanma

Keywords

HCCI
 Low Temperature
 Combustion
 Engine Performance
 Exhaust Emissions
 Combustion

Experimental Investigation of Performance Combustion and Emission Characteristics in an HCCI Engine Fuelled Isopropanol and Heptane Fuel Mixtures

Abstract

In this study, the effect of isopropanol on combustion and exhaust emissions was investigated experimentally in a single cylinder HCCI engine with port injection system. The experiments were carried out at 1000 min⁻¹ engine speed and 60 °C intake air temperature. Pure n-heptane and n-heptane isopropanol fuel mixtures (ip25 and ip50) were used in the study. In-cylinder pressure, heat release rate, start of combustion, combustion duration, pressure rise rate and exhaust emissions were examined. It was determined that in-cylinder pressure and rate of heat release decreased while the mixture getting leaner with all test fuels. The addition of isopropanol to n-heptane fuel led to delayed start of combustion and prolonged combustion duration. The maximum indicated thermal efficiency was obtained as 43.27 % at 2.4 lambda with ip25 fuel. The use of ip25 and ip50 fuels compared to n-heptane, the CO emissions worsened by 22.7% and 62.1%, respectively. However, HC emissions increased by 8.8% and 12%, respectively. The addition of isopropanol to the n-heptane fuel resulted in reduced pressure rise rate. Thus, spontaneous HCCI combustion is controlled.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

İçten yanmalı motorlarda termik verimin artırılması ve egzoz emisyonlarının eş zamanlı olarak kontrol edilebilmesi için birçok araştırma yapılmaktadır. Bunun temel nedeni petrol hızla tükenmekte ve dünya motorlu taşıtlardan kaynaklanan egzoz emisyonları ile hızla kirlenmektedir. Motor üreticileri ve birçok araştırmacı motor verimliliğini artırıp egzoz emisyonlarının azaltılması konusuna dikkat çekmişlerdir [1–6]. Homojen dolgulu sıkıştırma ile ateşlemeli (HCCI) motorlar, dizel (DI) ve buji ile ateşlemeli (SI) motorlara göre yüksek termik verim ve düşük egzoz emisyonlarına sahip olması nedeniyle ön plana çıkmaktadır [5,7–10]. HCCI motorlarda yanma kendiliğinden gerçekleşmekte ve DI ile SI motorlarda

olduğu gibi yanmayı kontrol eden harici bir sistem bulunmamaktadır [11,12]. HCCI motorlarda motor yükü hava/yakıt oranı ile kontrol edilmektedir [13]. HCCI motorlarda hava/yakıt karışımı; art egzoz gazı [14,15], sıkıştırma oranının artırılması [16,17], giriş sıcaklığının artırılması [18–20] gibi yöntemlerle ısıtarak, sıkıştırma zamanı sonunda yüksek gaz sıcaklıkları elde edilmesi sağlanır [11]. Sıkıştırma zamanı sonunda fakir hava/yakıt karışımı, yanma odasının her bölgesinde aynı anda kendiliğinden yanar. Hızlı gerçekleşen yanma, ısı kayıplarının azalmasına neden olarak indike termik verimin artmasını sağlar [11,12,21,22]. Ayrıca fakir hava/yakıt karışımı, yanma sonu sıcaklıklarının azalmasına neden olarak azotoksit (NO_x) emisyonlarını önemli ölçüde düşürür. Aynı zamanda fakir karışımın yanması ile is emisyonları da büyük ölçüde ortadan kalkar. HCCI motorların en önemli avantajı, düşük sıcaklık yanması ile NO_x ve is emisyonlarının eş zamanlı olarak azaltılabilmesidir. Bununla birlikte indike termik verimleri de yüksektir [15,23–25]. Ancak HCCI motorlarda yanma sürecinin kontrol edilememesi, dar çalışma aralığı ve hızlı gerçekleşen ısı dağılımı problemleri bulunmaktadır [11]. Özellikle yanma sürecinin kontrol edilmesinin zorluğu ve çalışma aralığının dar olması, günümüz taşıtlarında HCCI motorların kullanımını sınırlandırmaktadır [26–28]. Bununla birlikte HCCI motorların düşük motor yüklerinde tekleme problemi söz konusudur. Karışımın fakirleşmesi ile motor yükü azalmakta ve tekleme nedeniyle motor durmaktadır [11,29–31]. Özellikle tekleme sınırına yakın bölgelerde yanma sonu gaz sıcaklıklarının çok düşmesi hidrokarbon (HC) ve karbonmonoksit (CO) emisyonları artış göstermektedir [16,30,32]. Çünkü HC ve CO emisyonları yanma geçmişinden ve silindir içi gaz sıcaklıklarından hassas bir şekilde etkilenmektedir [11,20,22]. Ayrıca HCCI motorlarda yanma başlangıcını kontrol eden bir mekanizmanın bulunmaması ve yanmanın eş zamanlı olarak hızlı bir şekilde gerçekleşmesi, zengin karışım şartlarında basınç dalgalanmalarına sebep olarak vuru mu meydana gelmektedir [33–35]. Basınç dalgalanmalarını azaltmak ya da tamamen ortadan kaldırmak için bazı yöntemler kullanılmaktadır [11,12]. Bunlar; silindir içi art egzoz miktarının kontrolü [36–38] ve yüksek oktan sayısına sahip alternatif yakıtların kullanımınıdır [39–41]. İzopropanol SI ve DI motorlarda alternatif yakıt olarak kullanılabilirken, HCCI motorlarda yüksek oktan sayısına sahip olması nedeniyle yanmayı yavaşlatarak kontrol altına alınabilmesi için tercih edilebilir [41]. Ayrıca alkol kökenli yakıtların oksijen içeriği yanmayı iyileştirmektedir [2,42,43]. HCCI motorlarda izopropanolün yakıt olarak kullanımı ile ilgili literatürde az sayıda deneysel çalışma bulunmaktadır. Lü vd. [44], HCCI yanmasını yavaşlatmak için n-heptan yakıtına etanol, metanol, izopropanol ve metil tert-bütül eter ilave ederek yanma analizi yapmışlardır. Deneysel çalışma sonucunda metanol yakıtı kullanımı ile diğer yakıtlara göre yanmanın daha fazla yavaşladığı, yanma süresinin uzadığı tespit edilmiştir. Yanma hızına en düşük etkiyi metil tert-bütül eter göstermiştir. Ancak termik verim, egzoz emisyonları ve HCCI çalışma aralığı dikkate alındığında deney yakıtları içerisinde etanolün en uygun yakıt olduğu tespit edilmiştir. Uyumaz [41], HCCI bir motorda n-heptan yakıtına bütanol ve izopropanol ilavesi ile elde edilen karışım yakıtlarının farklı emme havası giriş sıcaklıklarında performans ve yanmaya etkisini incelemiştir. Deneysel sonuçları göstermiştir ki izopropanol yakıtı bütanol yakıtına göre daha kararlı bir HCCI yanması sağlamıştır. Lü vd. [45], n-heptan izopropanol yakıt karışımının HCCI bir motorda yakıt olarak kullanımında egzoz gazı geridonüşüm (EGR) miktarının yanmaya etkisini incelemiştir. Karışım yakıt içerisindeki izopropanol miktarı arttıkça indike ortalama efektif basıncın (İMEP) artış gösterdiği rapor edilmiştir. EGR miktarı arttıkça CO ve HC emisyonları kötüleşmektedir. Ayrıca EGR oranı yanmayı gecikmeye alarak yavaşlatmaktadır. Maurya ve Agarwal [32], etanol yakıtı kullanımının farklı giriş sıcaklıklarında HCCI çalışma aralığı ve yanmaya etkisini incelemiştir. Deneysel sonuçları göstermiştir ki giriş sıcaklığı maksimum silindir içi basıncını ve meydana geldiği krank açısını doğrudan etkilemektedir. Etanol yakıtı kullanımında tüm kararlı çalışma şartlarında NO_x emisyonu oldukça düşük iken CO ve HC emisyonları ise kötüleşmiştir. Yao vd. [46], metanol ve dimetil eter yakıtı kullanımının HCCI kontrol stratejileri üzerine deneysel bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Sonuçlar göstermiştir ki dimetil eter ve EGR oranı HCCI yanma başlangıcını ve yanma süresini eş zamanlı olarak kontrol altına almaktadır. Dimetil eter ve EGR'nin artırılması yanma verimini iyileştirmiştir. Vuru mu sınırına kadar dimetil eter artışı indike termik verimi de artırmıştır. Bununla beraber dimetil eter ve EGR oranı NO_x emisyonlarını kötüleştirmiştir.

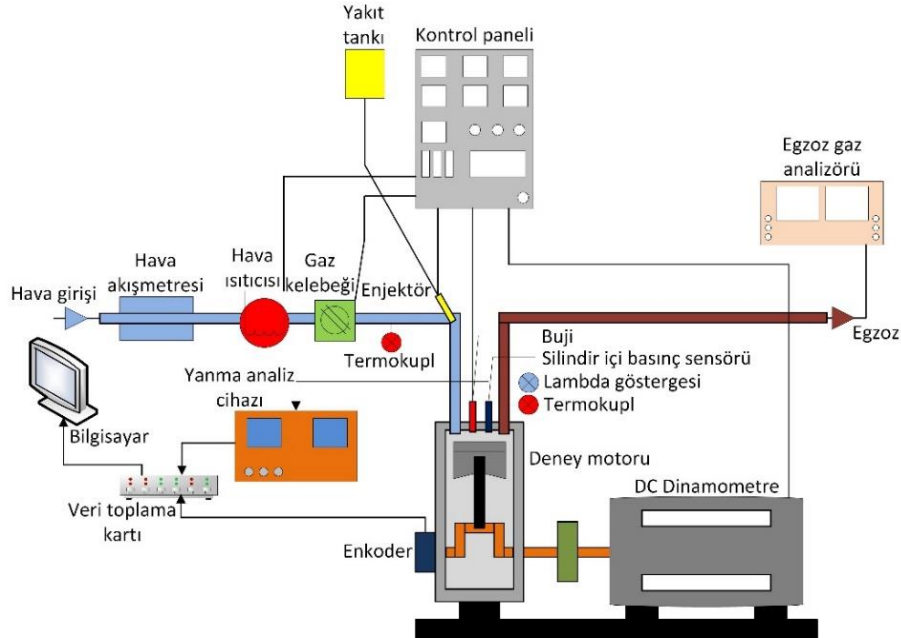
Bu çalışmada n-heptan ve izopropanol yakıt karışımlarının HCCI yanma üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Gerçekleştirilen çalışmada alternatif bir yakıt olan izopropanolün HCCI motorlarda kullanılması ile yüksek oktan sayısı sayesinde kontrollü HCCI yanmasının sağlanabileceği düşünülmektedir. Bunun için port enjeksiyon sistemine sahip, tek silindirli buji ile ateşlemeli motordan HCCI motora dönüşümü gerçekleştirilmiş bir deney motoru kullanılmıştır. Farklı oranlardaki n-heptan izopropanol yakıtlarının HCCI çalışma aralığı belirlenmiştir.

2. MATERYAL ve METOT (MATERIAL and METHOD)

Deneyler dört zamanlı, tek silindirli, buji ile ateşlemeli motordan HCCI motora dönüşümü gerçekleştirilmiş Ricardo Hydra deney motorunda gerçekleştirilmiştir. Deney motorunun teknik özellikleri Tablo 1'de, deney düzeneğinin şematik görünümü ise Şekil 1'de görülmektedir.

Tablo 1. Deney motorunun teknik özellikleri

Markası	Ricardo Hydra
Silindir sayısı	1
Çap (mm) X Kurs (mm)	80,26 X 88,90
Sıkıştırma Oranı	13:1
Supap sistemi	Üstten kamlı düşey iki supap
Yakıt sistemi	Port tipi enjeksiyon
Emme supabı açılma zamanlaması	ÜÖN'dan 12° KA önce
Emme supabı kapanma zamanlaması	AÖN'dan 56° KA sonra
Egzoz supabı açılma zamanlaması	AÖN'dan 56° KA önce
Egzoz supabı kapanma zamanlaması	ÜÖN'dan 12° sonra
Supap kalkma miktarı (mm)	Emme 5,5mm, egzoz 3,5mm



Şekil 1. Deney düzeneğinin şematik görünümü

Deneyler esnasında yakıt, port tipi enjeksiyon sistemi ile emme manifolduna püskürtülmüştür. Yakıt miktarı, kontrol paneli üzerinde yer alan yakıt kontrol sistemi kullanılarak ayarlanmıştır. Hava/yakıt oranının sabit tutulabilmesi ve yakıt tüketiminin belirlenebilmesi için yakıt kontrol paneli üzerinde yer alan potansiyometrede 100 eşit parçaya ayrılmış bölüntüler kullanılmıştır. Bu bölüntüler aracılığıyla enjektörün püskürtme karakteristiği tespit edilmiş ve yakıt tüketimi hesaplanmıştır. Aynı zamanda püskürtülen yakıt miktarının değiştirilmesiyle farklı hava fazlalık katsayısı (HFK) değerlerinde HCCI yanma sağlanmıştır.

Kontrol panelindeki yakıt püskürtme miktarının ayarlandığı skala 1,0 pozisyonuna alınmış ve motor sabit bir devirde çalıştırılmıştır. Yakıt deposu 0,01g hassasiyetinde terazi üzerine yerleştirilmiş ve motorun 120

saniyede tükettiği yakıt verisi kaydedilmiştir. Aynı motor hızında yakıt skalasının pozisyonu 2,0, 4,0, 6,0, 8,0 ve 10,0 olacak şekilde değiştirilerek birim zamanda püskürtülen yakıt miktarı belirlenmiş ve enjektörün yakıt karakteristik eğrisi elde edilmiştir. Deneyler esnasında farklı HFKlar için kaydedilen skala pozisyonuna göre, yakıt enjeksiyon karakteristik eğrisi üzerinden yakıt tüketimi hesaplanmıştır.

Deney motoru 6500 min⁻¹'de 30 kW güç absorbe edebilen McClure marka elektrikli tip dinamometreye bağlanmıştır. Emme havası giriş sıcaklığı ısıtma sistemi emme manifoldunun motor bloğuna bağlandığı noktanın hemen önünde bulunmaktadır. Emme havası giriş sıcaklığı, ısıtma sisteminin hemen arkasında yer alan K tipi termokupl kullanılarak ölçülmüş ve sıcaklık kapalı devre denetleyicisi ile sabit tutulmuştur. Silindir içi basıncın ölçümü için Kistler 6121 piezoelektrik basınç sensörü kullanılmıştır. Tablo 2'de basınç sensörünün teknik özellikleri görülmektedir.

Tablo 2. Basınç sensörünün teknik özellikleri

<i>Marka / model</i>	<i>Kistler 6121 piezoelektrik</i>
<i>Çalışma aralığı (bar)</i>	0 - 250
<i>Ölçüm hassasiyeti (pC/bar)</i>	14,7
<i>Çalışma sıcaklığı (°C)</i>	-50 - 350
<i>Ölçüm toleransı (+/- %)</i>	0,5

Silindir içi ham basınç sinyalleri Cussons P4110 yanma analiz cihazı ile toplanmış ve yükseltilmiştir. Alınan analog silindir içi basınç sinyalleri National Instruments marka USB 6259 model veri toplama kartında dijital sinyallere dönüştürülmüştür. Silindir içi pistonun konumunu belirlemek için krank mili üzerine bir enkoder bağlanmıştır. Enkoder her 0,36° krank açısında (KA) sinyal üretmektedir. Dolayısı ile bir çevrim için 2000 adet veri kaydedilmektedir. Dönüştürülen silindir içi basınç sinyalleri ve pistonun pozisyonu bilgisayara kaydedilmiştir. Her bir deney şartı için ardışık 50 çevrim boyunca elde edilen verilerin ortalaması alınmıştır.

Motor ilk çalıştırma esnasında buji ile ateşlemeli motor modunda çalıştırılmıştır. Çalışma sıcaklığına ulaşıldığında ateşleme sistemi kapatılarak HCCI yanması sağlanmıştır. HCCI modunda çalışma sağlandıktan sonra kararlı bir çalışma için yağlama yağı ve soğutma suyu sıcaklıkları sabit tutulmuştur. Deneyler 1000 min⁻¹ motor hızında 60 °C emme havası giriş sıcaklığında, sıkıştırma oranının 13:1 olduğu çalışma şartlarında gerçekleştirilmiştir. Deney yakıtı olarak n-heptan, ip25 (%25 izopropanol + %75 n-heptan) ve ip50 (%50 izopropanol + %50 n-heptan) yakıtları kullanılmıştır. Deney yakıtlarının kimyasal özellikleri Tablo 3'de görülmektedir.

Tablo 3. N-heptan ve izopropanol yakıtlarının özellikleri

	<i>n-Heptan</i>	<i>İzopropanol</i>
<i>RON</i>	0	107
<i>Kimyasal formül</i>	C_7H_{16}	$(CH_3)_2CHOH$
<i>Molar kütlesi (g/mol)</i>	100,21	60,10
<i>Yoğunluğu (kg/m³)</i>	679,5	809
<i>Kaynama noktası (K)</i>	371	355
<i>Alt ısı değeri (kJ/kg)</i>	44566	30447

Silindir içi basınç, ardışık 50 çevrim boyunca elde edilen verilerin ortalaması alınarak hesaplanmıştır. Çevrim başına 2000 veri kaydedilirken 50 çevrimde toplam 100000 verinin ortalaması alınmıştır. Bunun için MATLAB programlama kodu kullanılarak bir algoritma hazırlanmıştır. MATLAB algoritması

kullanılarak silindir içi basınç, ısı dağılımı, İMEP, yanma başlangıcı, yanma süresi ve termik verim hesaplanmıştır. Isı dağılımının belirlenebilmesi için termodinamiğin birinci yasasından faydalanılmıştır. Bu nedenle bir çevrim boyunca kütle ve gaz kaçakları ihmal edilmiştir. Silindir içinden silindir duvarına gerçekleşen ısı transferi, ısı yayılım oranını belirlemek için hesaplanmıştır. Krank açısına bağlı olarak ısı dağılımı Eş. 1 ile hesaplanmıştır.

$$\frac{dQ}{d\theta} = \frac{k}{k-1} P \frac{dV}{d\theta} + \frac{1}{k-1} V \frac{dP}{d\theta} + \frac{dQ_{ISI}}{d\theta} \quad 1$$

Burada dQ net ısı çıkışı, P ve V silindir basıncı ve silindir hacmidir. $d\theta$ krank açısının değişimi ve k özgül ısıların oranıdır. $\frac{dQ_{ISI}}{d\theta}$ ise silindir silindir duvarına ısı transferini ifade eder.

Newton'un soğutma yasasına göre içten yanmalı motorlarda silindir yüzeylerine olan ısı transferi Eş. 2'deki gibi hesaplanmaktadır.

$$\frac{dQ_{ISI}}{d\theta} = \frac{1}{6 \times n} \times h_g \times A \times (T_g - T_w) \quad 2$$

Burada n motor hızını, h_g anlık ısı taşınım katsayısını, A krank açısına bağlı ısı transferi yüzey alanını, T_g krank açısına bağlı anlık silindir içi ortalama gaz sıcaklığını ve T_w silindir duvar sıcaklığını ifade etmektedir.

Termik verim Eş. 3 ile hesaplanmıştır.

$$\eta_T = \frac{W_{net}}{\dot{m}_{n-heptan} \times Q_{LHV n-heptan} + \dot{m}_{izopropanol} \times Q_{LHV izopropanol}} \quad 3$$

Burada, W_{net} net işi, $\dot{m}_{izopropanol}$ ve $\dot{m}_{n-heptan}$ izopropanol ve n-heptanın çevrim başına yakıt tüketimini, $Q_{LHV izopropanol}$ ve $Q_{LHV n-heptan}$ ise izopropanol ve n-heptan yakıtlarının ısı değerini değerlerini ifade etmektedir.

Net iş Eş.4 ile hesaplanmıştır.

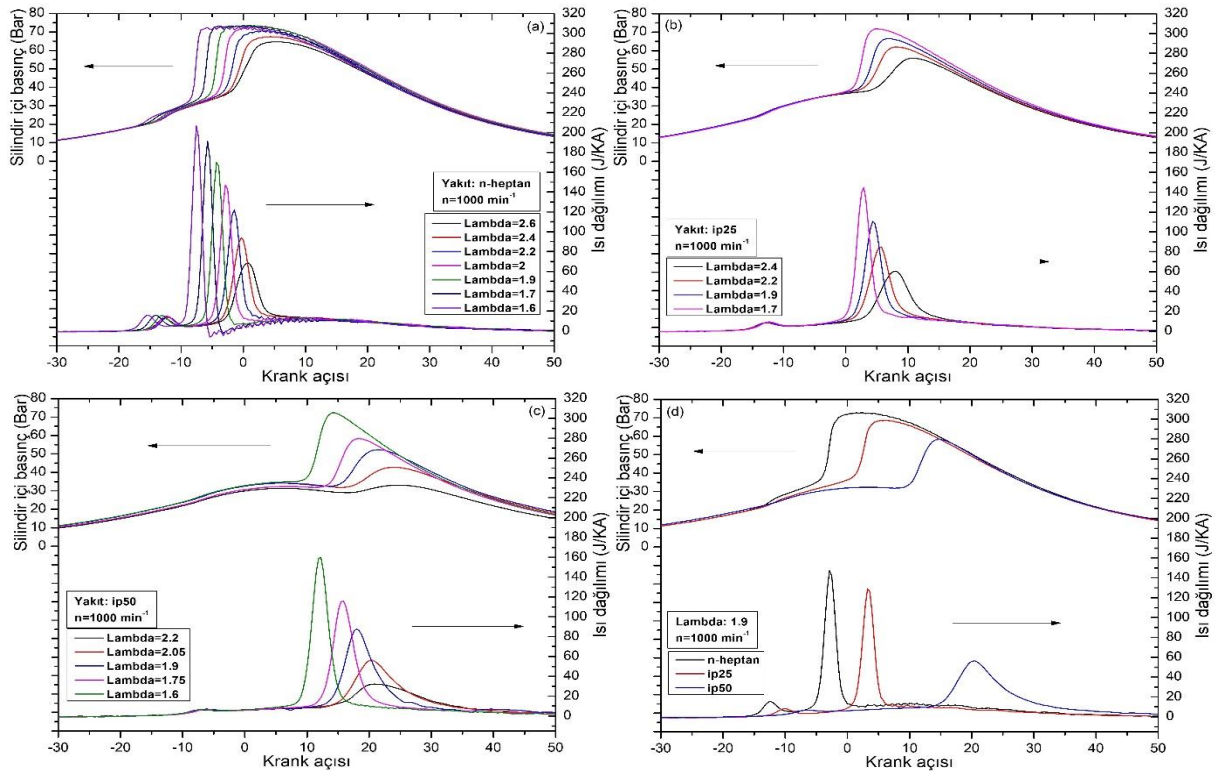
$$W_{net} = \int P dV \quad 4$$

İMEP değerleri, silindir sayısına, silindir hacmine ve motor hızına bağlı olmadığından, motor veriminin belirlenmesinde temel bir parametre olarak kullanılabilir. İMEP işin kurs hacmine bölünmesi ile elde edilmektedir. İMEP Eş. 5'de görüldüğü gibi hesaplanmaktadır. Burada V_{kurs} kurs hacmini ifade etmektedir.

$$\dot{IMEP} = \frac{W_{net}}{V_{kurs}} \quad 5$$

3. SONUÇLAR ve TARTIŞMA (RESULTS and DISCUSSION)

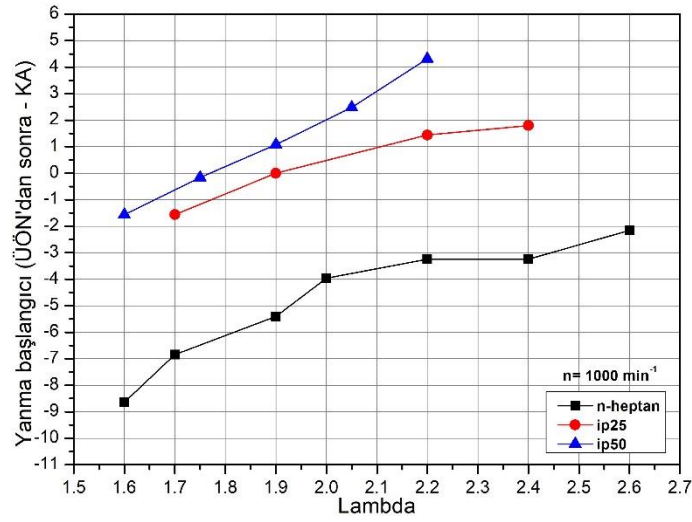
Şekil 2’de deney yakıtlarının farklı HFK değerlerinde silindir içi basınç ve ısı dağılımına etkisi görülmektedir. Çalışma 1000 min^{-1} motor hızında ve 60°C emme havası giriş sıcaklığında yapılmıştır. Şekil 2 (a)’da n-heptan yakıtı için en yüksek silindir içi basınç HFK’nın 1,6, en düşük silindir içi basınç ise HFK’nın 2,6 olduğu şartlarda elde edilmiştir. HFK 1,6 ile 2,6 olduğu şartlar n-heptan yakıtı için HCCI çalışma aralığını ifade etmektedir. HFK’nın 1,6’dan daha düşük yani daha zengin karışım şartlarında vuruntu problemi sebebiyle motor çalıştırılmamaktadır. Karışımın zenginleşmesi silindir içi kimyasal reaksiyonların hızlanmasına neden olur. Bu nedenle HCCI yanma hızlı gerçekleşir ve silindir içi basınç artış gösterir. Bununla birlikte basınç dalgalanmaları meydana gelir. Karışımın fakirleşmesi ile silindir içerisine sürülen enerji miktarı da azalmaktadır. Bununla birlikte silindir içi reaksiyon hızı azalmakta ve yanma sonu sıcaklıkları da oldukça düşmektedir. N-heptan için HFK’nın 2,6’dan daha yüksek olduğu değerlerde tekleme problemi sebebiyle HCCI yanma sağlanamamıştır. Aynı şartlar altında gerçekleştirilen deneyler neticesinde Şekil 2 (b) ve (c)’de sırası ile ip25 ve ip50 yakıtlarına ait silindir içi basınç ve ısı dağılımı değerleri görülmektedir. İp25 için çalışma aralığı HFK’nın 1,7-2,4 aralığında iken, ip50 yakıtı ile HFK’nın 1,6-2,2 aralığında HCCI yanma sağlanmıştır. N-heptan yakıtına izopropanol ilave edilmesi ile elde edilen karışım yakıtının oktan sayısı artış göstermektedir. Oktan sayısının artması yanmayı yavaşlatmaktadır [3]. Reaksiyon hızının yavaşlaması ile karışım yakıtlarında tekleme sınırı n-heptan yakıtına göre daha zengin karışımlara doğru kaymıştır. Şekil 2 (b) ve (c)’de görüldüğü gibi ip25 ve ip50 yakıtı kullanımında oktan sayısının artışına bağlı olarak yanma gecikmeye alınmıştır. Şekil 2 (d)’de aynı şartlar altında 3 deney yakıtının birbiri ile karşılıklı kıyaslaması yapılmıştır. HFK’nın 1.9 olduğu şartlarda en yüksek silindir içi basınç n-heptan yakıtı kullanımında 72,76 Bar olarak kaydedilmiştir. Aynı şartlar altında ip25 ve ip50 yakıtları kullanımında sırası ile 68,56 Bar ve 58,35 Bar maksimum basınç değerleri elde edilmiştir. Karışım yakıtlarında izopropanol miktarına bağlı olarak oktan sayısı artış göstermektedir. Oktan sayısı yanmayı yavaşlatmakta yanma sürecinin gecikmeye alınmasına neden olmaktadır. Aynı zamanda izopropanolün buharlaşma gizli ısısının n-heptandan yüksek oluşu yanmanın ilave olarak gecikmeye alınmasına neden olmaktadır. Genişleme zamanına kayan yanma neticesinde, silindir hacminin artması ile maksimum silindir içi basınç da azalmaktadır.



Şekil 2. Silindir içi basınç ve ısı dağılımının değişimi

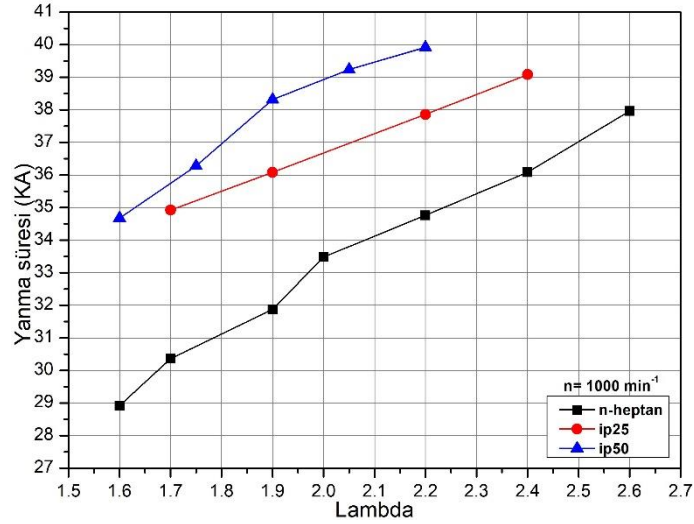
İçten yanmalı motorlarda silindir içerisindeki farklı ısı dağılım yüzdelere (%10, %50 ve %90) karşılık gelen krank açısı konumu, sırası ile CA10, CA50 ve CA90 olarak ifade edilirler. %10luk bir ısı dağılımına karşılık gelen (CA10) krank açısı konumu, yanma başlangıcı olarak kabul edilmektedir. HCCI yanmasında

yanma başlangıcı, kimyasal kinetiklere ve yanma odasındaki basınç-sıcaklık geçmişine bağlıdır [47]. Şekil 3'de farklı HFK değerlerinde n-heptan, ip25 ve ip50 test yakıtları kullanımında HCCI yanması için yanma başlangıcını göstermektedir. Zengin karışım şartlarında tüm test yakıtları için silindir içi reaksiyon hızı da artış göstermektedir. Bu nedenle yanma daha erken krank açılarındaki başlanmaktadır. Karışımın fakirleşmesi ile yanma başlangıcının tüm test yakıtları için gecikmeye alındığı görülmektedir. Bunun temel nedeni yüksek HFK değerlerinde karışımın düşük reaktivitesidir. Bu nedenle yanmayı başlatacak şartların oluşması uzun sürmekte ve yanma başlangıcı gecikmeye alınmaktadır. N-heptan yakıtına göre ip25 ve ip50 yakıtları kullanımında, izorpropanolün n-heptana göre daha zor buharlaşması, fakir karışım şartlarında yanma başlangıcının ekstra olarak gecikmeye alınmasına neden olmaktadır. Aynı deney şartları altında (HFK=1,9) buharlaşabilme özelliği yüksek olan n-heptan yakıtı ÜÖN'dan 5,4 °KA önce yanmaya başlanmaktadır. İp25 yakıtı tam ÜÖN'da, ip50 yakıtı ise ÜÖN'dan ancak 1,08 °KA sonra yanmaya başlanmaktadır. N-heptan izopropanol yakıt karışımlarının tüm HFK değerlerinde daha zor yanmaya başladığı Şekil 3'de görülmektedir.



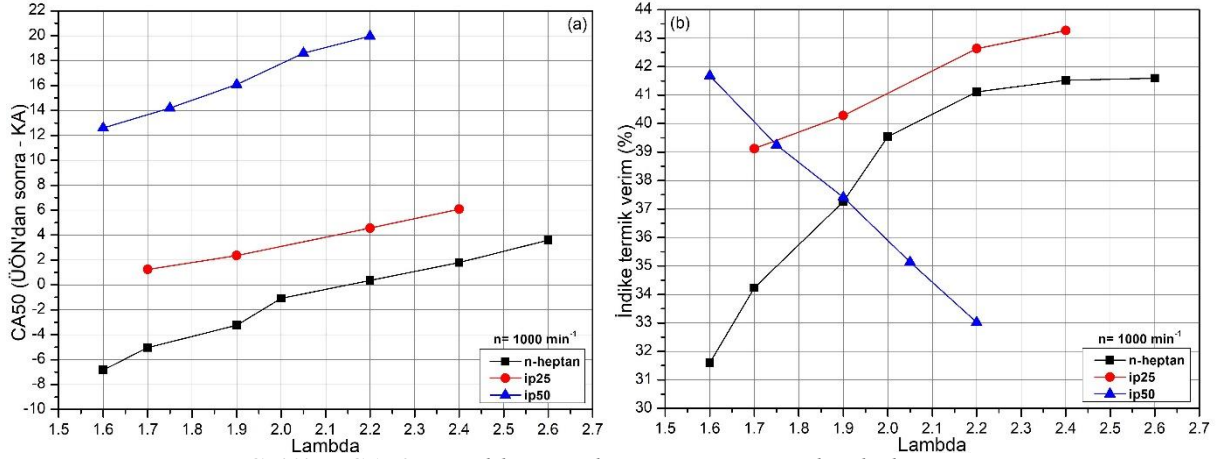
Şekil 3. Yanma başlangıcının HFK'ya bağlı değişimi

Şekil 4, n-heptan yakıtına izopropanol ilavesinin krank açısı cinsinden yanma süresine etkisini göstermektedir. Deney sonuçları gösteriyor ki karışım yakıtları içerisindeki izopropanol miktarı arttıkça yanma süresi de uzamaktadır. Bunun iki sebebi olabilir. Birinci sebep izopropanolün yüksek oktan sayısı ve yakıtın zor buharlaşabilmesi nedeniyle yanma süresi uzamaktadır. HCCI motorlarda yüksek oktan sayısına sahip yakıt kullanımı düşük sıcaklık yanması ile yüksek sıcaklık yanması arasında yer alan negatif sıcaklık katsayı bölgesinin uzamasına neden olmaktadır [3,47]. Buharlaşma gizli ısı yüksek olan alkollerin HCCI motorlarda yakıt olarak kullanımında ise yakıtın buharlaşması için gereken silindir içi şartların hazırlanması uzun sürmektedir [13,48,49]. Sonuç olarak yanma süresi uzamaktadır. İkinci sebep ise ip25 ve ip50 yakıtlarının yanma başlangıcının ÜÖN civarında olması ve yanmanın büyük bir bölümünün genişleme zamanına kaymasıdır. Genişleme zamanında silindir içi gazların sıcaklığı azalmakta ve yanma safhası yavaşlamaktadır. Özellikle fakir karışım şartlarında silindir içi reaksiyon hızının da düşmesi, yanma süresinin ilave olarak uzamasına neden olmuştur.



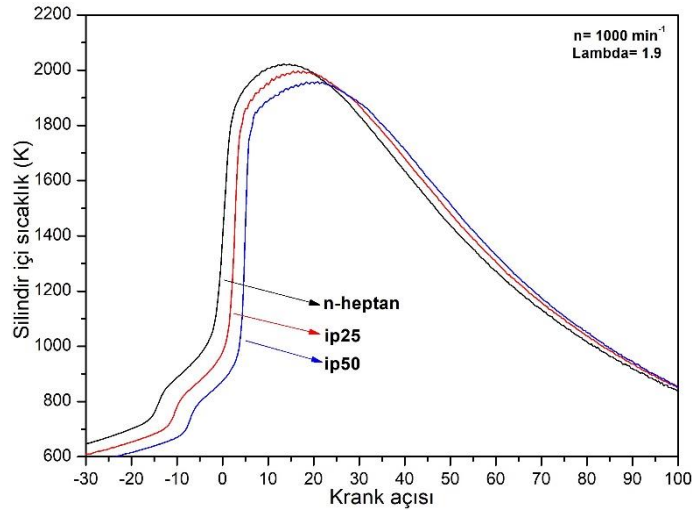
Şekil 4. Yanma süresinin HFK'ya bağlı değişimi

Kümülatif ısı dağılımının %50'sinin gerçekleştiği krank açısı CA50 olarak ifade edilmektedir ve CA50'nin yeri termik verimi önemli ölçüde etkilemektedir. Şekil 5 (a)'da CA50'nin Şekil 5 (b)'de ise indike termik verimin HFK'ya bağlı değişimi görülmektedir. Yakıt karışımları içerisindeki izopropanol miktarının artışına bağlı olarak oktan sayısı artış göstermekte ve yakıt daha zor buharlaşmaktadır. Bu nedenle yanma süresi uzamakta ve tutuşma başlangıcı gecikmeye alınmaktadır (Şekil 3 ve Şekil 4). N-heptan yakıtının yüksek reaktivitesi HCCI yanmanın daha erken krank açıları başlanmasına sebep olmaktadır. Buna bağlı olarak yanma süreci hızlı gelişmekte ve CA50 avansa alınmaktadır. Özellikle zengin karışım bölgelerinde silindir içi reaksiyon hızının yüksek olması ve yüksek reaktiviteli yakıt kullanımında CA50'nin ÜÖN'dan önce meydana gelmesini sağlamaktadır. Bu durum piston üzerine uygulanan negatif işin artmasına ve sonuç olarak indike termik verimin düşük olmasına neden olmaktadır. Karışımın fakirleşmesi ile reaksiyon hızı da azalmakta ve yanma yavaşlamaktadır. Buna bağlı olarak CA50 gecikmeye alınmaktadır. CA50'nin ÜÖN'dan hemen sonra meydana gelmesi, en yüksek termik verimin elde edilmesini sağlamaktadır [11]. N-heptan yakıtı kullanımında karışımın fakirleşmesi ile CA50 ÜÖN'dan sonraki bir krank açısına doğru kaymaktadır. Yukarıda bahsedilen sebeplerle indike termik verim artış göstermektedir. N-heptan yakıtı için en yüksek indike termik verim HFK'nın 2,6 olduğu ve CA50'nin 3,6 °KA ÜÖN'dan sonra gerçekleştiği şartlarda %41,59 olarak tespit edilmiştir. İp25 yakıtı kullanımında CA50'nin hemen hemen tüm HFK değerlerinde ÜÖN'dan hemen sonra meydana gelmesi indike termik verimin artmasını sağlamıştır. İp 25 yakıtı için en yüksek indike termik verim HFK'nın 2,4 olduğu ve CA50'nin 6,08 °KA ÜÖN'dan sonra gerçekleştiği şartlarda indike termik verim % 43,27 olarak gerçekleşmiştir. İp50 yakıtı kullanımında ise yanmanın büyük bir kısmının genişleme zamanında gerçekleşmesi indike termik verimin de oldukça düşük olmasına sebep olmuştur. İp50 yakıtı kullanımı ile HFK'nın 1.6 olduğu ve CA50'nin 12,6 ÜÖN'dan sonra gerçekleştiği şartlarda indike termik verim %41,68 iken, karışımın fakirleşmesi ile HFK'nın 2,2 olduğu çalışma şartlarında CA50 ÜÖN'dan 19,96 °KA sonra gerçekleşmiştir. Bu durum indike termik verimin %33,02'ye kadar gerilemesine neden olmuştur.



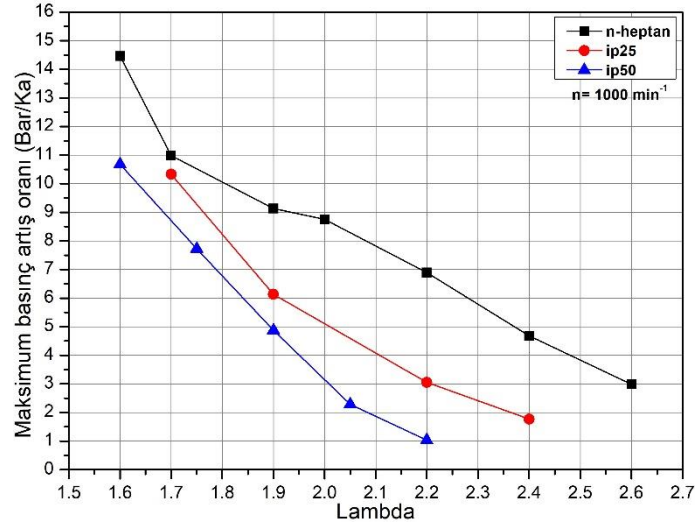
Şekil 5. CA50 ve indike termik verimin HFK'ya bağlı değişimi

Şekil 6'da HFK'nın 1,9 olduğu şartlar altında silindir içi gaz sıcaklığının değişimi görülmektedir. N-heptan yakıtı kullanımı ile en yüksek silindir içi gaz sıcaklığı 2021 K olarak gerçekleşmiştir. N-heptan yakıtına izopropanol ilavesi ile silindir içi gaz sıcaklıklarının azaldığı Şekil 6'da açık bir şekilde görülmektedir. İp25 yakıtı ile en yüksek 1988 K gaz sıcaklığına ulaşılırken bu değer ip50 yakıtı kullanımında en yüksek 1950 K olarak tespit edilmiştir. Karışım yakıtlarının HCCI motorda kullanılması ile yanmanın büyük bir kısmının genişleme zamanına kaydığı önceki bölümde ifade edilmişti. Bu nedenle genişleme zamanında ısı kayıplarının fazla oluşu silindir içi gaz sıcaklıklarının da azalmasına neden olmaktadır. Ayrıca izopropanolün düşük alt ısıl değeri de ilave olarak silindir içi gaz sıcaklıklarının azalmasına katkıda bulunmaktadır. Düşük silindir içi gaz sıcaklığı oksidasyon reaksiyonlarını kötü yönde etkilemekte ve özellikle CO ile HC emisyonlarının artmasına neden olmaktadır.



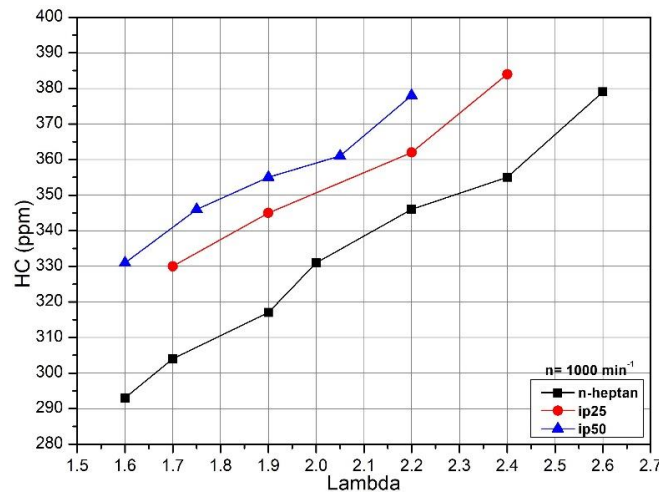
Şekil 6. Silindir içi gaz sıcaklığının değişimi

Özellikle zengin karışım şartlarında hızlı ısı salınımı ve vuruntu problemi HCCI motorların en önemli problemlerindedir. Yanma odasındaki vuruntu ve istenmeyen basınç dalgalanmaları basınç artış oranı ile belirlenmektedir. Basınç artış oranı sayısal olarak, silindir içi basıncın krank açısına göre 1. türevi ile hesaplanmaktadır [11]. Şekil 7'de basınç artış oranının HFK'ya bağlı değişimi görülmektedir. Silindir içerisine daha düşük miktarda enerji sürülmesi yani karışımın fakirleşmesi ile yanma sonunda daha düşük basınç elde edileceğinden vuruntu eğilimi azalmaktadır. Aynı HFK değerlerinde ve farklı test yakıtlarına ait basınç artış oranı değerleri incelendiğinde karışım yakıtlarındaki oktan sayısının artmasına bağlı olarak basınç artış oranı da azalmaktadır. Oktan sayısının artışı ile ısı dağılımının daha yavaş ve kontrollü gerçekleşmesi basınç artış oranının da azalmasını sağlamıştır. Ortalama en düşük basınç artış oranı ip50 yakıtı ile elde edilmiştir.



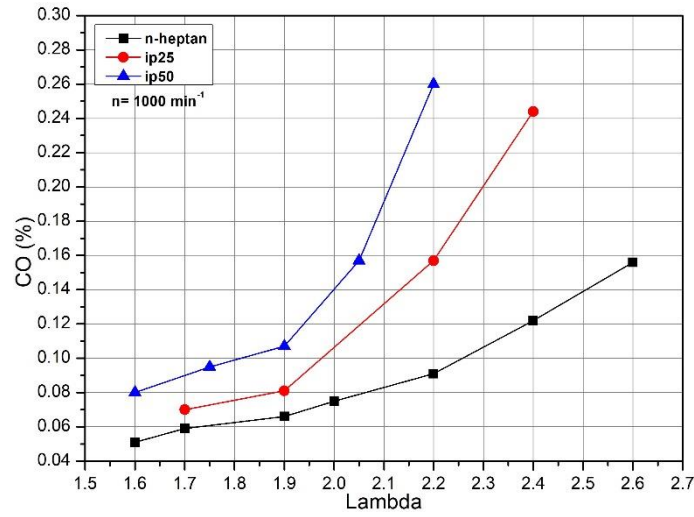
Şekil 7. Basınç artış oranının HFK'ya bağlı değişimi

HC emisyonları eksik yanma ürünü olarak egzoz sisteminde görülmektedir. SI motorlarda HC emisyonlarının farklı oluşum nedenleri vardır. Bunlardan biri silindir duvarlarına yakın bölgelerde yanmaya katılmayan hava yakıt karışımlarından kaynaklıdır. Bir diğer neden yanma odası girintilerinde kalan ve yanmaya katılmayan hava yakıt karışımlarıdır. Bir diğer neden ise port enjeksiyonlu sistemlerde emme ve sıkıştırma zamanı boyunca buharlaşan yakıtın silindir duvarlarında yağ katmanları tarafından emilmesi ve genişleme ile egzoz zamanı sürecinde buharlaşarak tekrar silindir içerisine dahil olmasıdır. Son olarak ise motor çalışma şartlarına bağlı olarak özellikle düşük motor hızlarında eksik yanmanın gerçekleşmesi nedeniyle HC emisyonları meydana gelir [11]. HCCI motorlardan kaynaklanan HC emisyonları SI motordakine benzer olarak silindir içi girintilerde ve silindir duvarına yakın bölgelerde meydana gelen eksik yanma sebebiyle gerçekleşmektedir. Özellikle düşük sıcaklıkta gerçekleşen HCCI yanması HC emisyonlarının artışına sebep olmaktadır. Şekil 8'de HC emisyonlarının HFK'ya bağlı değişimi görülmektedir. HFK artışıyla HC emisyonlarının tüm test yakıtlarında artış gösterdiği görülmektedir. Bunun nedeni karışımın fakirleşmesi ile silindire sürülen enerji miktarı da azalmakta ve yanma sonu gaz sıcaklıkları da azalmaktadır. Düşük sıcaklık oksidasyon reaksiyonlarını yavaşlatmakta, özellikle silindir duvarlarına yakın bölgelerde yanma tamamlanamamakta ve HC emisyonları artış göstermektedir. En düşük HC emisyonu tüm HFK değerlerinde n-heptan yakıtı ile elde edilmiştir. izopropanol katkılı yakıt karışımlarında yanmanın genişleme zamanına kayması hacmin genişlemesine ve dolayısı ile silindir içi oksidasyon reaksiyonlarının yavaşlamasına neden olmaktadır. Bu nedenle karışım yakıtlarındaki izopropanol miktarı arttıkça HC emisyonları artış göstermiştir. Aynı HFK değerinde yapılan deney sonuçları karşılaştırılırsa HFK'nın 1,9 olduğu şartlarda n-heptan yakıtına göre ip25 ve ip50 yakıtları kullanımında HC emisyonları sırası ile %8,8 ve %12 oranında artış göstermiştir.



Şekil 8. HC emisyonlarının HFK'ya bağlı değişimi

CO emisyonları silindir içerisinde yeterli oksijen bulunmadığı ya da düşük sıcaklık nedeniyle oksidasyon reaksiyonlarının bozulması ile meydana gelen bir emisyon türüdür. CO emisyonu çalışma koşullarından ve HFK'daki değişimden oldukça hassas bir şekilde etkilenmektedir. HFK düşük olduğu yani çok zengin karışım şartlarında CO emisyonları sürekli bir artış eğilimindedir. Ancak aşırı fakir karışım şartlarında silindir içerisinde yeterli oksijen bulursa da silindir içi gaz sıcaklıklarının düşük olması sebebiyle CO emisyonları yeniden artış gösterir. Silindir içi düşük sıcaklık seviyesi CO'nun CO₂'ye dönüşümünü engellemektedir [11,12]. Şekil 9'da HFK'ya bağlı olarak CO emisyonlarının değişimi görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi tüm test yakıtlarında karışımın fakirleşmesi ile CO emisyonları artmıştır. Tüm test yakıtlarının kullanımında vuruşu sınırına yakın HFK değerlerinde yanmanın büyük bir kısmının ÜÖN'ya civarında gerçekleşmesi CO emisyonlarının düşük olmasını sağlamıştır. Aynı zamanda silindir içerisine sürülen enerji miktarına bağlı olarak gaz sıcaklıkları da artmakta ve CO'nun CO₂'ye dönüşümü gerçekleşmektedir. Ancak karışımın fakirleşmesi ile birlikte özellikle ip25 ve ip50 yakıtları kullanımında yanma safhasının genişleme zamanına kayması, bununla birlikte silindire sürülen enerjinin azalması ile yanma sonu sıcaklıklarının ilaveten azalması neticesinde CO emisyonları oldukça fazla artış göstermiştir. Aynı HFK değerinde (1,9) n-heptan yakıtına göre ip25 yakıtının CO emisyonu %22,7 kötüleşirken bu oran ip50 yakıtı kullanımında %62,1 olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 9. CO emisyonlarının HFK'ya bağlı değişimi

4. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada referans n-heptan yakıtı ile ip25 ve ip50 yakıtlarının HCCI bir motorda farklı HFK değerlerinde yanma ve egzoz emisyonlarına etkisi incelenmiştir. Deneyler 60 °C emme havası giriş sıcaklığında ve 1000 min⁻¹ sabit motor hızlarında gerçekleştirilmiştir. N-heptan yakıtına izopropanol ilavesi çalışma aralığının daralmasına sebep olmuştur. Bunun temel sebebi izopropanolün oktan sayısının yüksek olması nedeniyle yanmanın gecikmeye alınması ve ısı dağılımının büyük kısmının genişleme zamanında gerçekleşmesidir. Bu nedenle aynı çalışma şartlarında (n=1000 min⁻¹, HFK=1,9) n-heptan yakıt ile elde edilen silindir içi basınç ip25 ve ip50 yakıtından daha fazladır. N-heptan yakıtının reaktivitesinin yüksek olması yanmanın daha erken krank açıları başlanmasına neden olmuştur. Bu nedenle zengin karışım şartlarında vuruşu meydana gelmiş ve yanma süresi kısalmıştır. İp25 ve ip50 yakıtları kullanımında yanma başlangıcı gecikmeye alınmış ve n-heptan yakıtına göre daha uzun sürede yanma tamamlanmıştır. N-heptan yakıtına izopropanol ilave edilmesi ısı dağılımının daha yavaş ve kontrollü gerçekleşmesini sağlamıştır. Yüksek oktan sayısı nedeniyle izopropanol katkılı yakıtlarda CA50'nin yeri n-heptana göre gecikmeye alınmıştır. İp25 yakıtı ile tüm HFK değerlerinde en yüksek indike termik verim elde edilmiştir. ip50 yakıtı kullanımında yanma genişleme zamanına kaymış ve oldukça uzun sürmüştür. Bu nedenle karışımın fakirleşmesi ile indike termik verim oldukça faz düşmüştür. En yüksek indike termik verim ip25 yakıtı kullanımında, HFK'nın 2,4 olduğu şartlarda %43,27 olarak kaydedilmiştir. İzopropanolün yüksek oktan sayısı yanmayı yavaşlatmış ve basınç artış oranının kritik seviyenin altında kalmasını sağlamıştır. HFK'nın 1,9 olduğu şartlarda n-heptan yakıtının basınç artış oranı 9,13 Bar/KA iken, ip25 ve ip50 yakıtları

kullanımında sırası ile 6,13 Bar/KA ve 4,87 Bar/KA olarak elde edilmiştir. İzopropanol ilavesi özellikle fakir karışım şartlarında yanmanın büyük bir bölümünün genişleme zamanına kaymasına neden olmuştur. Bu nedenle yanma sonu sıcaklıkları azalmış ve eş zamanlı olarak CO ve HC emisyonları n-heptan yakıtına göre artış göstermiştir. Emme havası giriş sıcaklığının artırılması ya da daha yüksek sıkıştırma oranına sahip HCCI motorlarda izopropanolün yakıt olarak kullanılmasının uygun olduğu görülmektedir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Hellström E, Stefanopoulou A, Vavra J, Babajimopoulos A, Assanis DN, Jiang L, et al. Understanding the Dynamic Evolution of Cyclic Variability at the Operating Limits of HCCI Engines with Negative Valve Overlap. *SAE Int J Engines* 2012;5:2012-01-1106. doi:10.4271/2012-01-1106.
- [2] He BQ, Liu M Bin, Zhao H. Comparison of combustion characteristics of n-butanol/ethanol-gasoline blends in a HCCI engine. *Energy Convers Manag* 2015;95:101-9. doi:10.1016/j.enconman.2015.02.019.
- [3] Calam A, İcingür Y. Hava Fazlalık Katsayısı ve Oktan Sayısı Değişiminin HCCI Yanma Karakteristiklerine ve Motor Performansına Etkileri. *J Polytech* 2018;0900:607-18. doi:10.2339/politeknik.444377.
- [4] Asad U, Kumar R, Zheng M, Tjong J. Ethanol-fueled low temperature combustion: A pathway to clean and efficient diesel engine cycles. *Appl Energy* 2015;157:838-50. doi:10.1016/j.apenergy.2015.01.057.
- [5] Agarwal AK. Biofuels (alcohols and biodiesel) applications as fuels for internal combustion engines. *Prog Energy Combust Sci* 2007;33:233-71. doi:10.1016/j.peccs.2006.08.003.
- [6] Aksoy F, Yılmaz E. %10 Balık Yağı Biyodizeli-%90 Dizel Yakıt Karışımı İle Çalışan Direkt Enjeksiyonlu Bir Dizel Motorunda Yanma ve Performans Karakteristiklerinin İncelenmesi 2019;7:12-24. doi:10.29109/gujsc.466544.
- [7] Epping K, Aceves S, Bechtold R, Dec JE. The Potential of HCCI Combustion for High Efficiency and Low Emissions 2002. doi:10.4271/2002-01-1923.
- [8] Bendu H, Sivalingam M. Experimental investigation on the effect of charge temperature on ethanol fueled HCCI combustion engine. *J Mech Sci Technol* 2016;30:4791-9. doi:10.1007/s12206-016-0951-6.
- [9] Babajimopoulos A, Lavoie GA, Assanis DN. Modeling HCCI Combustion With High Levels of Residual Gas Fraction – A Comparison of Two VVA Strategies 2011;2003.
- [10] Demirci OK, Çinar C. The Investigation of the Effects of Using Natural Gas on the Performance and Exhaust Emissions in an HCCI-DI Engine HCCI- DI Bir Motorda Doğal Gaz Kullanımının Performans ve Egzoz Emisyonlarına Etkisinin İncelenmesi 2019;7:317-30. doi:10.29109/gujsc.521668.
- [11] Zhao H. HCCI and CAI Engines for the Automotive Industry. Cambridge: Elsevier; 2007. doi:10.1533/9781845693541.3.342.
- [12] Heywood JB. Internal Combustion Engine Fundamentals. New York: McGrawHill Press; 1988.
- [13] Maurya RK, Agarwal AK. Experimental study of combustion and emission characteristics of ethanol fuelled port injected homogeneous charge compression ignition (HCCI) combustion engine. *Appl Energy* 2011;88:1169-80. doi:10.1016/j.apenergy.2010.09.015.
- [14] Dubreuil A, Foucher F, Mounaïm-Rousselle C, Dayma G, Dagaut P. HCCI combustion: Effect of NO

- in EGR. *Proc Combust Inst* 2007;31 II:2879–86. doi:10.1016/j.proci.2006.07.168.
- [15] Lü XC, Chen W, Huang Z. A fundamental study on the control of the HCCI combustion and emissions by fuel design concept combined with controllable EGR. Part 2. Effect of operating conditions and EGR on HCCI combustion. *Fuel* 2005;84:1084–92. doi:10.1016/j.fuel.2004.12.015.
- [16] Iida M, Hayashi M, Foster DE, Martin JK. Characteristics of Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI) Engine Operation for Variations in Compression Ratio, Speed, and Intake Temperature While Using n-Butane as a Fuel. *J Eng Gas Turbines Power* 2003;125:472. doi:10.1115/1.1501914.
- [17] Aceves SM, Smith JR, Westbrook CK, Pitz WJ. Compression Ratio Effect on Methane HCCI Combustion. *J Eng Gas Turbines Power* 1999;121:569. doi:10.1115/1.2818510.
- [18] Swami Nathan S, Mallikarjuna JM, Ramesh A. Effects of charge temperature and exhaust gas recirculation on combustion and emission characteristics of an acetylene fuelled HCCI engine. *Fuel* 2010;89:515–21. doi:10.1016/j.fuel.2009.08.032.
- [19] Maurya RK, Agarwal AK. Experimental investigation on the effect of intake air temperature and air-fuel ratio on cycle-to-cycle variations of HCCI combustion and performance parameters. *Appl Energy* 2011;88:1153–63. doi:10.1016/j.apenergy.2010.09.027.
- [20] Cinar C, Uyumaz A, Solmaz H, Sahin F, Polat S, Yilmaz E. Effects of intake air temperature on combustion, performance and emission characteristics of a HCCI engine fueled with the blends of 20% n-heptane and 80% isooctane fuels. *Fuel Process Technol* 2015;130:275–81. doi:10.1016/j.fuproc.2014.10.026.
- [21] Tanaka S, Ayala F, Keck JC, Heywood JB. Two-stage ignition in HCCI combustion and HCCI control by fuels and additives. *Combust Flame* 2003;132:219–39. doi:10.1016/S0010-2180(02)00457-1.
- [22] Tanaka S, Ayala F, Keck JC. A reduced chemical kinetic model for HCCI combustion of primary reference fuels in a rapid compression machine. *Combust Flame* 2003;133:467–81. doi:10.1016/S0010-2180(03)00057-9.
- [23] Ma J, Lü X, Ji L, Huang Z. An experimental study of HCCI-DI combustion and emissions in a diesel engine with dual fuel. *Int J Therm Sci* 2008;47:1235–42. doi:10.1016/j.ijthermalsci.2007.10.007.
- [24] Gan S, Ng HK, Pang KM. Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI) combustion: Implementation and effects on pollutants in direct injection diesel engines. *Appl Energy* 2011;88:559–67. doi:10.1016/j.apenergy.2010.09.005.
- [25] Kong S, Reitz RD. Application of Detailed Chemistry and CFD for Predicting. *Proc Combust Inst* 2002;29:663–9. doi:10.1016/S1540-7489(02)80085-2.
- [26] Wang Z, Liu H, Ma X, Wang J, Shuai S, Reitz RD. Homogeneous charge compression ignition (HCCI) combustion of polyoxymethylene dimethyl ethers (PODE). *Fuel* 2016;183:206–13. doi:10.1016/j.fuel.2016.06.033.
- [27] Polat S. An experimental study on combustion, engine performance and exhaust emissions in a HCCI engine fuelled with diethyl ether-ethanol fuel blends. *Fuel Process Technol* 2016;143:140–50. doi:10.1016/j.fuproc.2015.11.021.
- [28] Lawler B, Lacey J, Güralp O, Najt P, Filipi Z. HCCI combustion with an actively controlled glow plug: The effects on heat release, thermal stratification, efficiency, and emissions. *Appl Energy* 2018;211:809–19. doi:10.1016/j.apenergy.2017.11.089.

- [29] Uyumaz A. Combustion, performance and emission characteristics of a DI diesel engine fueled with mustard oil biodiesel fuel blends at different engine loads. *Fuel* 2018;212:256–67. doi:10.1016/j.fuel.2017.09.005.
- [30] Calam A, Solmaz H, Yılmaz E, İçingür Y. Investigation of effect of compression ratio on combustion and exhaust emissions in A HCCI engine. *Energy* 2019;168:1208–16. doi:10.1016/j.energy.2018.12.023.
- [31] Lü XC, Chen W, Huang Z. A fundamental study on the control of the HCCI combustion and emissions by fuel design concept combined with controllable EGR. Part 1. the basic characteristics of HCCI combustion. *Fuel* 2005;84:1074–83. doi:10.1016/j.fuel.2004.12.014.
- [32] Maurya RK, Agarwal AK. Experimental study of combustion and emission characteristics of ethanol fuelled port injected homogeneous charge compression ignition (HCCI) combustion engine. *Appl Energy* 2011;88:1169–80. doi:10.1016/j.apenergy.2010.09.015.
- [33] Iida M, Aroonsrisopon T, Hayashi M, Foster D, Martin J. The Effect of Intake Air Temperature, Compression Ratio and Coolant Temperature on the Start of Heat Release in An Hcci(Homogeneous Charge Compression Ignition) Engine. *Sae* 2001;111:220–6. doi:10.4271/2001-01-1880.
- [34] Andrae MM, Cheng WK, Kenney T, Yang J. On HCCI Engine Knock 2007. doi:10.4271/2007-01-1858.
- [35] Dec JE, Yang Y, Dronniou N. Boosted HCCI - Controlling Pressure-Rise Rates for Performance Improvements using Partial Fuel Stratification with Conventional Gasoline. *SAE Int J Engines* 2011;4:2011-01-0897. doi:10.4271/2011-01-0897.
- [36] Nishi M, Kanehara M, Iida N. Assessment for innovative combustion on HCCI engine by controlling EGR ratio and engine speed. *Appl Therm Eng* 2016;99:42–60. doi:10.1016/j.applthermaleng.2015.11.126.
- [37] Jung D, Iida N. Closed-loop control of HCCI combustion for DME using external EGR and rebreathed EGR to reduce pressure-rise rate with combustion-phasing retard. *Appl Energy* 2015;138:315–30. doi:10.1016/j.apenergy.2014.10.085.
- [38] Das P, Subbarao PMV, Subrahmanyam JP. Control of combustion process in an HCCI-DI combustion engine using dual injection strategy with EGR. *Fuel* 2015;159:580–9. doi:10.1016/j.fuel.2015.07.009.
- [39] Lü X, Hou Y, Zu L, Huang Z. Experimental study on the auto-ignition and combustion characteristics in the homogeneous charge compression ignition (HCCI) combustion operation with ethanol/n-heptane blend fuels by port injection. *Fuel* 2006;85:2622–31. doi:10.1016/j.fuel.2006.05.003.
- [40] Zhang C, Wu H. Combustion characteristics and performance of a methanol fueled homogenous charge compression ignition (HCCI) engine. *J Energy Inst* 2016;89:346–53. doi:10.1016/j.joei.2015.03.005.
- [41] Uyumaz A. An experimental investigation into combustion and performance characteristics of an HCCI gasoline engine fueled with n -heptane , isopropanol and n -butanol fuel blends at different inlet air temperatures. *Energy Convers Manag* 2015;98:199–207. doi:10.1016/j.enconman.2015.03.043.
- [42] Yusri IM, Mamat R, Azmi WH, Najafi G, Sidik NAC, Awad OI. Experimental investigation of combustion, emissions and thermal balance of secondary butyl alcohol-gasoline blends in a spark ignition engine. *Energy Convers Manag* 2016;123:1–14. doi:10.1016/j.enconman.2016.05.082.
- [43] Masurier JB, Foucher F, Dayma G, Dagaut P. Ozone applied to the homogeneous charge compression ignition engine to control alcohol fuels combustion. *Appl Energy* 2015;160:566–80.

doi:10.1016/j.apenergy.2015.08.004.

- [44] Lü X, Ji L, Zu L, Hou Y, Huang C, Huang Z. Experimental study and chemical analysis of n -heptane homogeneous charge compression ignition combustion with port injection of reaction inhibitors. *Combust Flame* 2007;149:261–70. doi:10.1016/j.combustflame.2007.01.002.
- [45] Lü X, Yuchun H, Libin J, Linlin Z, Zhen H. Heat Release Analysis on Combustion and Parametric Study on Emissions of HCCI Engines Fueled with 2-Propanol / n -Heptane Blend Fuels. *Energy Fuels* 2006;20:1870–8. doi:10.1021/ef0601263.
- [46] Yao M, Chen Z, Zheng Z, Zhang B, Xing Y. Study on the controlling strategies of homogeneous charge compression ignition combustion with fuel of dimethyl ether and methanol. *Fuel* 2006;85:2046–56. doi:10.1016/j.fuel.2006.03.016.
- [47] Maurya RK, Agarwal AK. Experimental investigations of performance, combustion and emission characteristics of ethanol and methanol fueled HCCI engine. *Fuel Process Technol* 2014;126:30–48. doi:10.1016/j.fuproc.2014.03.031.
- [48] Saxena S, Schneider S, Aceves S, Dibble R. Wet ethanol in HCCI engines with exhaust heat recovery to improve the energy balance of ethanol fuels. *Appl Energy* 2012;98:448–57. doi:10.1016/j.apenergy.2012.04.007.
- [49] Sjöberg M, Dec JE. Combined Effects of Fuel-Type and Engine Speed on Intake Temperature Requirements and Completeness of Bulk-Gas Reactions for HCCI Combustion Reprinted From : *Homogeneous Charge Compression Ignition Engines* 2003. SAE Tech Pap Ser 2003-01-3173 2003;2003.

Overview of Automatic Speech Recognition, Approaches and Challenges: Way the Future to Turkish Speech Recognition

 Saadin OYUCU^{1,*} , Hayri SEVER² , Hüseyin POLAT³ 
¹ Gazi University Faculty of Technology, Department of Computer Engineering, 06500, Yenimahalle/ANKARA

² Çankaya University Faculty of Engineering, Department of Computer Engineering, 06790, Etimesgut/ANKARA

³ Gazi University Faculty of Technology, Department of Computer Engineering, 06500, Yenimahalle/ANKARA

Graphical/Tabular Abstract

Article Info:

Research article

Received: 08/05/2019

Revision: 16/09/2019

Accepted: 06/10/2019

Highlights

- Speech Recognition.
- Feature Extraction.
- Turkish Speech Recognition.

Keywords

 Speech Recognition.
 Feature Extraction.
 Turkish Speech
 Recognition.

Figure A shows the application area of the Applications Automatic Speech Recognition (ASR) system. Adaptation is required for adaptation processes to be carried out according to the Application area. During the Speech Processing phase, which is the first entry point of the ASR system, feature extraction is performed from the audio signal. Individual properties are obtained by different feature extraction techniques. For example, Mel Frequency Cepstral Coefficient (MFCC) is a feature extraction technique commonly used in speech recognition systems. Decoder, one of the other components of ASR, converts the feature vectors obtained by using Acoustic Model (AM) and Language Model (LM) into phoneme sequences. In acoustic modeling, firstly, the posterior probability of the phoneme within a given time signal is calculated. In the artificial neural network-based acoustic model, the posterior probability of phonemes is independent for each window. This independence means that the phonemes in a word are independent of each other.

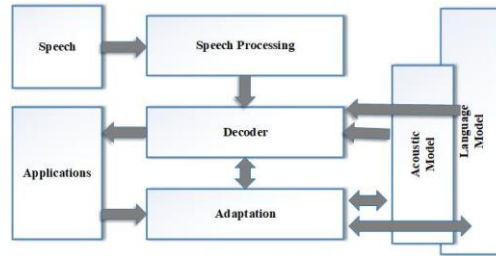


Figure A. Basic architecture of speech recognition system.

Purpose: This study presents a literature review on speech recognition and then discusses the recorded signs of progress made in this area of research for different languages. The data sets used in speech recognition systems, feature extraction approaches, speech recognition methods and performance evaluation criteria are examined and the focus is on the development of speech recognition and the difficulties in this field.

Theory and Methods: In this study, literature review (systematic), which is an important component for a scientific article, was carried out. This process was carried out by the combination of different methods. A combination of review approaches is given.

Results: According to the information obtained as a result of the research; Computational architectures that can be applied to resistance to the acoustic environment, self-learning in ASR, detection of unknown words, the success of the Turkish ASR at a broad and limited repertoire level, insufficient source status and Automatic Speech Recognition ASR were evaluated. In addition, the future of Turkish ASR was discussed and recommendations were made to overcome the current difficulties for Turkish ASR.

Conclusion: The aim of this study is to examine the current speech recognition methods and approaches and to present the developments in this field in detail. For this reason, approaches, datasets and the difficulties faced by the researchers in their studies in this field are discussed in the scope of the study. The effect of deep learning and classical approaches on ASR was investigated. A road map is provided for researchers to incorporate the detailed information necessary for their work in this field to their own work and to overcome the present challenges.



Otomatik Konuşma Tanımaya Genel Bakış, Yaklaşımlar ve Zorluklar: Türkçe Konuşma Tanımının Gelecekteki Yolu

Saadin OYUCU^{1,*} , Hayri SEVER² , Hüseyin POLAT³ 

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

²Çankaya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, 06790, Etimesgut/ANKARA

³Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, 06500, Yenimahalle/ANKARA

Öz

İnsanlar arasındaki en önemli iletişim yöntemi olan konuşmanın, bilgisayarlar tarafından tanınması önemli bir çalışma alanıdır. Bu araştırma alanında farklı diller temel alınarak birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Literatürdeki çalışmalar konuşma tanıma teknolojilerinin başarımının artmasında önemli rol oynamıştır. Bu çalışmada konuşma tanıma ile ilgili bir literatür taraması yapılmış ve detaylı olarak sunulmuştur. Ayrıca farklı dillerde bu araştırma alanında kaydedilen ilerlemeler tartışılmıştır. Konuşma tanıma sistemlerinde kullanılan veri setleri, özellik çıkarma yaklaşımları, konuşma tanıma yöntemleri ve performans değerlendirme ölçütleri incelenerek konuşma tanımının gelişimi ve bu alandaki zorluklara odaklanılmıştır. Konuşma tanıma alanında son zamanlarda yapılan çalışmaların olumsuz koşullara (çevre gürültüsü, konuşmacı ve dilde değişkenlik) karşı çok daha güçlü yöntemler geliştirmeye odaklandığı izlenmiştir. Bu nedenle araştırma alanı olarak genişleyen olumsuz koşullardaki konuşma tanıma ile ilgili yakın geçmişteki gelişmelere yönelik genel bir bakış açısı sunulmuştur. Böylelikle olumsuz koşullar altında gerçekleştirilen konuşma tanımadaki tıkanıklık ve zorlukları aşabilmek için kullanılabilir yöntemleri seçmede yardımcı olunması amaçlanmıştır. Ayrıca Türkçe konuşma tanımadaki kullanılan ve iyi bilinen yöntemler karşılaştırılmıştır. Türkçe konuşma tanımının zorluğu ve bu zorlukların üstesinden gelebilmek için kullanılabilir uygun yöntemler irdelenmiştir. Buna bağlı olarak Türkçe konuşma tanımının gelecekteki rotasına ilişkin bir değerlendirme ortaya konulmuştur.

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 08/05/2019
Düzeltilme: 16/09/2019
Kabul: 06/10/2019

Anahtar Kelimeler

Konuşma Tanıma
Özellik Çıkarması
Yapay Zekâ
Türkçe Konuşma Tanıma

Keywords

Speech Recognition
Feature Extraction
Artificial Intelligence
Turkish Speech
Recognition

Overview of Automatic Speech Recognition, Approaches and Challenges: Way the Future to Turkish Speech Recognition

Abstract

Speech is a paramount means of communication among humans, which makes recognition of the speech by computers a study area of significance. In this research area, many studies have been carried out based on different languages. Studies in the literature have played an important role in increasing the performance of speech recognition technologies. This study presents a literature review on speech recognition and then discusses the recorded signs of progress made in this area of research for different languages. The data sets used in speech recognition systems, feature extraction approaches, speech recognition methods and performance evaluation criteria are examined and the focus is on the development of speech recognition and the difficulties in this field. Recent studies in the field of speech recognition have focused on developing more powerful methods against adverse conditions (environmental noise, speaker and language variability). Therefore, a general perspective on recent advances in speech recognition in unfavorable conditions is presented. In this way, an attempt has been made to help in selecting the methods that could be used to overcome the congestion and difficulties in speech recognition under adverse conditions. In addition, the well-known methods used in Turkish speech recognition were compared. Difficulty in the recognition of Turkish speech and appropriate methods to overcome these difficulties have been investigated in detail. Accordingly, a future route assessment of Turkish speech recognition has been put forward.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Temelde insanların birbirleri ile iletişimini destekleyen teknolojiler zaman içerisinde yapısal olarak değişmiş ve insan-makine etkileşimi kavramı ortaya çıkmıştır [1]. Erken evrelerde basit tuşlu sistemler ile gerçekleştirilen insan makine veya elektronik cihaz etkileşimi günümüzde yerini dokunmatik sistemlere bırakmıştır [2]. Fakat bu durum bile insanların makine veya elektronik cihazlar ile iletişimini sınırlı olarak sağlamaktadır. İnsanların makine veya elektronik cihazlarla ana dillerini konuşarak iletişim kurması, makine veya elektronik cihazların komut ve kontrol mekanizmasının daha hızlı bir şekilde çalıştırılmasına olanak vermektedir. Bu nedenle Otomatik Konuşma Tanıma (ASR: Automatic Speech Recognition) sistemleri geliştirilmekte ve kullanım alanı her geçen gün artmaktadır.

ASR sistemleri iletişim, eğitim, elektronik eşya, savunma sanayi, adli ve istihbarat gibi alanlarda sıklıkla kullanılmaktadır (Tablo 1) [3]. ASR sistemleri ile metne aktarılan konuşmalar üzerinde yapay zekâ teknolojileri kullanılarak konuşma anlama ve duygu analizi gibi işlemler de gerçekleştirilmektedir [4]. Konuşma anlama ile komuta kontrol işlemleri yapılabildiği gibi aynı zamanda kişisel asistanlar da geliştirilebilmektedir [5]. Duygu analizi ise bir konuşmanın içeriğine göre konuşmacının içerisinde bulunduğu duygu durumunun belirlenmesidir [6]. Konuşma içerisindeki duyguların analizi ile özellikle çağrı merkezlerinde hizmet kalitesinin artırılması amaçlanmaktadır. Ayrıca konuşma metinleri analiz edilerek müşteri ilişkileri yönetilmekte ve müşterilere özel fırsatlar sunulmaktadır [7].

Tablo 1. Konuşma tanıma teknolojisinin kullanıldığı alanlar ve uygulamalar

Kullanım Alanı	Uygulama	Girdi	Çıktı
<i>İletişim alanı</i>	<i>Telefon rehberinden sesli sorgulama</i>	<i>Konuşma sinyali</i>	<i>Konuşulan kelimeler</i>
<i>Eğitim alanı</i>	<i>Yabancı dil eğitiminde kelimelerin doğru okunuşunu öğretmek</i>	<i>Konuşma sinyali</i>	<i>Konuşulan kelimeler</i>
<i>Elektronik</i>	<i>Fırın, çamaşır makinesi ve buzdolabı gibi ev eşyalarında konuşma tanıma</i>	<i>Konuşma sinyali</i>	<i>Konuşulan kelimeler</i>
<i>Savunma</i>	<i>Savunma sanayide kullanılan araçların kontrol edilmesi</i>	<i>Konuşma sinyali</i>	<i>Konuşulan kelimeler</i>
<i>Yapay zekâ</i>	<i>Robotların kontrolü</i>	<i>Konuşma sinyali</i>	<i>Konuşulan kelimeler</i>
<i>Sağlık alanı</i>	<i>Doktorların muayene raporlarını yazmak</i>	<i>Konuşma sinyali</i>	<i>Konuşulan kelimeler</i>
<i>Çağrı merkezleri</i>	<i>Telefon görüşmelerinin otomatik yazıya dökülmesi ve kalite kontrol</i>	<i>Konuşma sinyali</i>	<i>Konuşulan kelimeler</i>

ASR sistemleri sadece sosyal, kültürel ve ekonomik alanda değil aynı zamanda adli ve istihbari alanlarda da yaygın olarak kullanılmaktadır [8]. İstihbari alanda şüpheli şahısların konuşmalarının ASR sistemleri ile metne aktarılması ve bu metinler üzerinde suç analizi yapılması çalışılmaktadır. Yine istihbarat amacıyla terör gruplarına ait karasal, uydu, kablo ve internet üzerinden yapılan radyo ve televizyon yayınlarında geçen konuşmalar ASR sistemleri ile metin haline getirilmektedir. Bu metinler üzerinde kelime yakalama veya büyük veri analizi yapılabilmektedir. Konuşulan ifadenin doğru bir şekilde metne aktarılması ise önem arz etmektedir. Bu nedenle ASR sistemlerinin başarımını arttırmak amacıyla birçok çalışma yapılmıştır. Fakat ASR sistemlerinin başarısı henüz istenilen seviyeye ulaşamamıştır.

Prakoso ve arkadaşlarına göre insanlar tarafından konuşulan kelimeleri bilgisayar tarafından okunabilir metne dönüştürmesini sağlayan bir teknoloji olarak ifade edilen ASR farklı çalışma alanlarının bir arada kullanılmasını gerektirmektedir [9]. Farklı disiplinlerin bir arada kullanılması ve genel yapısının karmaşık olması ASR sistemlerinin başarım oranları üzerinde etkili olmaktadır. Başarım oranlarını olumsuz yönde etkileyen bu karmaşıklık ASR sistemleri üzerine daha birçok çalışma yapılması gerektiğini ortaya koymuştur. ASR sistemlerinde arzu edilen başarı seviyesine ulaşamamanın nedenlerinden birisi de geleneksel yapay sinir ağlarının eğitim zamanının uzun olmasından kaynaklanmaktadır. Fakat bu tıkanıklık

Grafik İşlem Birimi (GPU: Graphics Processing Unit) tabanlı işlemlerin yaygınlaşması ile aşılmış görülmektedir [10]. GPU tabanlı işlemler ile birden fazla katmana sahip derin öğrenme tabanlı yapay sinir ağlarının eğitilmesi çok daha kısa sürmektedir. Bu nedenle daha önceleri klasik yöntemlerle eğitilen ASR modelleri derin öğrenmeye dayalı çok katmanlı yapay sinir ağı mimarileri kullanılarak eğitildiğinde daha yüksek başarımlarına sahip ASR sistemleri ortaya çıkmaya başlamıştır.

Son yıllarda Türkçe ASR sistemlerinde de umut vaat eden gelişmeler olmuştur. Türkçe yapısı gereği konuşma tanıma alanında birçok zorluğa sahiptir. Bu zorlukların en başında ise Türkçe'nin sondan eklemeli yapısı ve üretken bir dil olması gelmektedir [11]. Üretken dil yapısı kelime uzayını genişlettiğinden bir kelimedenden sonra gelebilecek kelimelerin tahminini zorlaştırmaktadır. Ayrıca Türkçe ASR sistemleri için gerekli olan modellerinin eğitilmesinde kullanılacak olan konuşma ve metin verisinin azlığı Türkçe için gerçekleştirilen çalışmaların önünde büyük bir engel olarak görülmektedir. Türkçe konuşma ve metin verisinin hazırlanması için yapılan çalışmaları yaygınlaştırmak ve geliştirmek için bazı girişimler olmuştur. Interactive Systems Laboratories, her biri 20 dakika olan 100 konuşmacıdan oluşan, Türkçe gazetelerin konuşma bölümlerini içeren Global Phone adlı çok dilli bir konuşma veri tabanı toplamıştır [12]. Orta Doğu Teknik Üniversitesi Bilişim Enstitüsü, Sabancı Üniversitesi ile işbirliği ile Türkçe metin veri kümesi geliştirmek için çalışmaktadır [13]. Bir diğer yakın tarihli proje ise OrienTel projesidir. Bu proje Türkçe telefon konuşma veri tabanının tasarımını içermektedir [14]. Diğer bir veri kümesi ise Boğaziçi Üniversitesi'nin oluşturduğu Türkçe haber yayınlarından elde edilen konuşma veri kümesidir [15].

Türkçe üzerine hazırlanan veri kümeleri Türkçe dili üzerine geliştirilen ASR sistemlerinin geliştirilmesini hızlandırmıştır. Fakat Türkçenin üretken morfolojisi, pek çok eşsiz kelime formunu beraberinde getirerek tahmin olasılığını düşürmektedir [16]. Fince, Estonca ve Çekçe gibi morfolojik açıdan zengin diğer diller de ASR sistemlerinin geliştirilmesini zorlaştırmaktadır [17]. Bu zorluğu aşabilmek için ASR sistemlerinin geliştirilmesinde dil modellemesinin yanında okunuş sözlüğü kullanılmaktadır. Bilgi edinimi için gerekli olan istatistiksel dil modelleri, verilen bir kelimedenden bir sonraki kelimenin tahmini görevini yerine getirmektedir. N-gram tabanlı dil modelleri ise dilin düzenlerini yakalayabilirken kelime kümelenmesi tabanlı modeller, verilerin ses şiddeti ile ilgili bilgilerini daha iyi tanımlayabilmektedir [18].

Bu çalışma kapsamında literatürde ASR sistemleri üzerine gerçekleştirilmiş çalışmalar detaylı olarak incelenmiş, mevcut ASR sistemlerinin gereklilikleri, bileşenleri ve kullanılan yöntemler araştırılmıştır. Buna bağlı olarak da Türkçe ASR sistemlerinin geliştirilmesindeki zorluklar analiz edilerek, Türkçe ASR sistemlerinin geleceği ile ilgili bir perspektif oluşturulmaya çalışılmıştır. Sonuçta, Türkçe ASR sistemleri üzerine çalışacak araştırmacılara elde edilen bilgi birikiminin aktarılması ve yardımcı olunması amaçlanmıştır. Bu çalışmada ayrıca ASR sistemlerinin başarımlarının artırılması için gerekli olan akustik model, dil modeli ve okunuş sözlüğünün Türkçe ASR sistemi üzerindeki etkileri de irdelenmiştir. Bu etkiler tartışmaya açılarak Türkçe ASR sistemlerinin başarımlarının artırılması ve sondan eklemeli dil yapısının dezavantajının ortadan kaldırılması hedeflenmiştir.

1.1. Literatür Taraması (Literature Review)

Literatürdeki çalışmalar ASR alanındaki mevcut durumu yeni ve birleştirici bir bakış açısıyla tamamlamaktadır. Literatür bu bakış açısıyla incelendiğinde biyolojik öğrenme teorilerinin ortaya çıkması ve yapay sinir ağlarının ilk modellerin üretilmesinin 1940'lı yıllara dayandığı görülmektedir [19]. McCulloch ve Pitts, McCulloch-Pitts nöronu adı verilen nöronların otomata benzer bir modelini geliştirmişlerdir [20]. Model, çıkışın pozitif veya negatif olduğunu test ederek iki farklı girdi kategorisini tanıyan ikili bir cihaz olarak literatüre kazandırılmıştır. Bu modelin başarılı olmamasının sebebi ağırlıkların insan operatörler tarafından ayarlanması gerekliliğidir.

1950'lerde bir psikolog olan Rosenblatt yapay bir nöronun eğitilebilir olduğunu göstermiştir [21]. Nöron eğitiminin ardından bir ya da iki gizli katmanı olan bir sinir ağını eğitmek için geri yayılma ile bağlantılı yaklaşımlar geliştirilmiştir [22]. Rumelhart ve arkadaşları derin sinir ağlarını eğitmek için geri yayılım kullanmış ve geri yayılma algoritmasının popülerleşmesini sağlamıştır. Waibel, bir girişin uzun bir dizi olması zorluğunu yöneten Zaman Gecikmeli Sinir Ağı (TDNN: Time Delay Neural Network) yaklaşımını sunmuştur [23]. Bu yaklaşım özellikle ASR sistemlerinde giriş olarak verilen zamana bağlı konuşma bilgisinin yapay sinir ağları ile işlenebilmesinin önünü açmıştır. Bu yaklaşımda giriş bilgisinin tümüne bir

defa bakmak yerine, her birim bir defa girişin bir alt kümesi olarak sunulmuştur. Böylelikle uzun bağımlılıkların eğitilebilmesi gerçekleştirilebilmiştir.

Yapay sinir ağlarının eğitilebilme ve geri yayılma problemleri giderildikten sonra ASR sistemleri için gerekli olan modelleri geliştirebilmek için farklı yaklaşımlar sunulmuştur. Saklı Markov Modelleri (HMM: Hidden Markov Model) ile ilk modeller üretildikten sonra birden fazla katmana sahip yapay sinir ağı modelleri geliştirilmiştir. Özellikle zaman bağımlı girdileri modelleyebilmek için Zaman Gecikmeli Sinir Ağı (TDNN: Time Delay Neural Network) yaklaşımı geliştirilmiştir. Waibel ve arkadaşları TDNN ile HMM arasında bir karşılaştırma yapmış ve TDNN yaklaşımının özellikle ASR sistemlerinde daha düşük hata oranı verdiği gösterilmiştir [24]. Ancak birçok sinir ağının geri yayılma ve ağırlık güncelleme işlemi ile ilgili sorunları mevcuttur. Özellikle uzun ve zamana bağlı bilgilerin modellemesindeki zorlukları çözebilmek için Uzun Kısa Süreli Bellek (LSTM: Long Short Term Memory) Hochreiter ve Schmidhuber tarafından önerilmiştir [25]. Arısoy ve Saraçlar LSTM yapısını Türkçe yayın haberlerinin transkripsiyonu için kullanmış ve tekrarlayan sinir ağlarını kullanarak bir ASR sistemi geliştirmiştir [26].

Yapay sinir ağlarının çok katmanlı modellerinin geliştirilmesi ve geri yayılma işleminin sorunları nispeten giderildikten sonra derin öğrenme olarak adlandırılan mevcut olarak sıklıkla kullanılan yöntem 2006'da başlamıştır [27], [28]. Bu kapsamda Hinton, Derin İnanç Ağları'nın (DBN: Deep Belief Network) açgözlü yaklaşım ile eğitimini öngören bir strateji kullanarak verimli bir şekilde eğitilebileceğini göstermiştir. Stratejinin amacı ağırlıkları rastgele değil daha akıllı bir şekilde başlatmaktır [28].

Yapay sinir ağındaki ağırlıkların rastgele değil de daha akıllı bir şekilde değiştirilmesi yüksek hesaplama ihtiyacı gerektirmektedir. Ayrıca yapay sinir ağındaki katman sayısının da artması yüksek hesaplama ihtiyacını beraberinde getirmiştir. CPU'ların bu konudaki yetersizliği derin sinir ağlarının eğitimi işleminin GPU'lara aktarılması ile giderilmiştir. Raina ve arkadaşlarının 2009 yılında gerçekleştirdiği bir çalışmada CPU yerine GPU kullanmanın işlem hızının 70 kat daha hızlı olabileceği gösterilmiştir [29]. Böylelikle ASR sistemleri için gerekli olan hesaplama ihtiyacı sağlanmış ve çok katmanlı mimarilerin geliştirilmesine olanak sağlanmıştır.

Derin öğrenme tabanlı yaklaşımlar özellikle görüntü işleme, konuşma tanıma, dil modelleme, ayrıştırma, konuşma çevirisi, araç otomasyonu ve benzeri birçok araştırma alanında yüksek başarımlar göstermiştir. Derin öğrenme yaklaşımlarının yüksek başarımlarının nedeni büyük miktarda veri ile eğitildiğinde çok karmaşık ve birleşik bir yapıyı bulma ve farklı öğrenme yetenekleridir [30]. Derin öğrenme yaklaşımları ile birden fazla katmana sahip modeller, ASR için gerekli olan akustik modelleri geliştirmek için kullanılmıştır [31]. Fohr ve arkadaşları derin sinir ağlarını saklı markov modelleri ile birleştirmiş ve hibrid bir mimari sunmuştur [31]. Bu mimari kurgu haber yayınlarından oluşan bir veri kümesi ile eğitilmiştir. Elde edilen başarımlar oranları tek başına kullanılan HMM veya derin olmayan yapay sinir ağlarına göre çok daha yüksektir.

Derin öğrenme yaklaşımları çoğunlukla İngilizce, Çince ve İspanyolca gibi kaynak bakımından zengin diller için sıklıkla uygulanmıştır. Türkçe üzerine gerçekleştirilen ASR araştırmaları Türkçe'nin sondan eklemeli bir yapıya sahip olması nedeni ile yetersiz kalmaktadır. ASR sistemlerinde büyük kelime dağarcığının Derin öğrenme tabanlı yaklaşımlar her ne kadar başarımlar oranlarını arttırsa da hala istenilen seviyeye ulaşılamamıştır. Bu nedenle geniş dağarcık problemini çözmek amacıyla heceleme veya gövde sonlarındaki ekleri ortadan kaldırarak çözümleme gibi yaklaşımlar önerilmiştir [32].

Klamanuka'nın gerçekleştirdiği çalışmada ise akustik modelleme için derin sinir ağlarının kullanılmasının büyük kelime dağarcığına sahip Türkçe ASR için henüz tam olarak kullanılmadığı fark edilmiş ve derin sinir ağlarını kullanarak bir ASR sistemi geliştirilmiştir. Daha önceki geleneksel Gauss karışımı modeli ve HMM yöntemiyle derin öğrenme yöntemi karşılaştırılmıştır. Derin öğrenme ve saklı markov modelinin hibrid bir şekilde kullanılması geleneksel olarak eğitilmiş ASR sistemlerine göre daha başarılı olduğu gösterilmiştir. Gerçekleştirilen literatür çalışmasında geleneksel yaklaşımlar ve derin öğrenme tabanlı yaklaşımlar detaylı olarak incelenmiştir.

Tablo 2'de farklı ASR çalışmalarında kullanılan yöntem, uygulama alanı ve bu çalışmalar hakkındaki değerlendirmelerimize yer verilmiştir.

Tablo 2. Kullanılan yöntem ve uygulama alanına göre gerçekleştirilen çalışmalar

Kaynak	Kullanılan yöntem	Uygulama alanı	Değerlendirme
[33]	Gizli Markov Modeli Araç Seti (HTK: Hidden Markov Model Toolkit) kullanılarak bir ASR sistemi oluşturulmuştur. Veri hazırlama görevleri, dilbilgisi ve okunuş sözlüğü HTK araç seti ile geliştirilmiştir.	ASR sisteminin başarı ölçümü, konuşma bozukluğu olan ve Malayca konuşan çocuklar üzerine gerçekleştirilmiştir. Malay-Polinezya dilleri, ayrıca Avustralya dilleri olarak da bilinen batı alt familyasına ait fonetik bir dildir.	Bu çalışmada, konuşma engelli bireylerin konuşma anlaşılabilirliğini ölçmede ASR uygulamalarının potansiyeli araştırılmıştır.
[34]	Bu çalışmada, düşük bant konuşma işlemi ve akustik modelleme yönteminin özelliklerinden faydalanılarak kodlama eğitiminde Mel düşük bant konuşma tanıma işlemi önerilmiştir.	Çalışmada konuşma verilerinin yanı sıra, farklı çalışmalar ile karşılaştırma yapabilmek için konuşma tanıma deneyleri sunulmuştur. Gürültülü ortamlarda farklı filtrelerin kullanılması ile elde edilen aurora2 veri kümesi kullanılmıştır.	Eğitim sürecinde daha yüksek seviyede gürültü içeren Mel düşük bantlarına daha düşük ağırlıklar tahsis edilerek gürültü davranışı eğitebilir ve gürültü azaltmada daha iyi performans gösterilebilir.
[35]	Çocukların konuşmasını tanımak için yetişkinlerden elde edilen veriler kullanılmıştır. İki farklı transfer öğrenme yaklaşımı karşılaştırılmıştır. Önceden eğitilmiş yetişkin modeline akustik model uyarlaması yapılmıştır.	Sistemin eğitimi için Mandarin yetişkin konuşma eğitim kümesi "King-ASR-118 mobile speech corpus"dan alınan veriler kullanılmıştır. Dört tip cep telefonu ile 975 kişiden yaklaşık 360 bin farklı konuşmadan oluşmaktadır.	Çocukların konuşmalarının işlenmesi, büyük ölçekli çocuk konuşma verilerinin bulunmaması nedeniyle yetişkinler için konuşma tanıma görevinden daha zorlayıcıdır.
[36]	Bu çalışmada Kaldi araç seti kullanılarak Hintçe ASR modeli sunulmuştur. Akustik modelleme, Markov modelleri ve Gaussian karışımları kullanılarak yapılmıştır. N-gram dil modeli kullanılarak hem monophone hem de triphone modelinin performansı sunulmuştur.	Kaldi araç seti kullanarak Hintçe dilinin ASR performansını değerlendirmek amacıyla MFCC ve Algısal Doğrusal Tahmini (PLP: Perceptual Linear Prediction) özellikleri, AMUAV corpus'un 1000 adet Hintçe cümle verisi kullanılarak elde edilmiştir.	Triphone modeli kelime hata oranını azaltmıştır. Fakat Hintçe üzerine eğitim verilerinin çoğaltılması gerekmektedir. Çok katmanlı modeller için 1000 adet cümle verisi yetersiz kalmaktadır.
[37]	Bu çalışma Mandarin ve İngilizce üzerine gerçekleştirilmiştir. Kod geçişli konuşma tanıma performansını artırmak için çok görevli öğrenme yaklaşımı önerilmiştir.	Bu çalışma kapsamındaki deneyler bir kamu veri kümesi olan LDC2015S04 üzerinde gerçekleştirilmiştir. Konuşmacılar cinsiyete göre dengelenmiştir ve 19 ile 33 yaş arasındadır.	Kod geçişli konuşma tanıma görevi için dil modelinin etkisi üzerine araştırmaların yapılması gerekmektedir.
[38]	Bu çalışmada ses komutlarına göre kod oluşturma işlemi için Java dili temel alınmıştır. Belli başlı komutların	Bu çalışma görme engelliler için programlama kavramlarını öğrenmeyi	Sadece belirli komutlar üzerine sistemin geliştirilmesi geniş konuşma alanına sahip

Kaynak	Kullanılan yöntem	Uygulama alanı	Değerlendirme
	okunuşları ile sistem eğitilmiş ve bir akustik model oluşturulmuştur.	kolaylaştırılan bir web uygulaması sunmaktadır.	ASR'nin başarımını net olarak vermemektedir.
[39]	Bu çalışmada, konuşma tanıma için ileri beslemeli yapay sinir ağları ve dikkat tabanlı Seq2Seq modelleri arasında deneye dayalı bir karşılaştırma yapılmıştır.	Tüm modeller, LDC veri tabanında bulunan standart Fisher-Swbd veri kümesi üzerinde eğitilmiştir. Hiper parametre ayarlaması için RT02 corpus'un (2004S11) bir kısmı kullanılmıştır.	Geçici sınıflandırma kaybı ile eğitilmiş uçtan uca modeller, eğitim sürecini basitleştirmektedir. Fakat büyük dil modelleriyle sistemin karşılaştırılması gerekmektedir.
[40]	ASR performansını artırmak için Microsoft uygulama program arayüzü, İngilizce ses modeli ve bir Tayca ses modeli sunan Google kullanarak iki katmanlı konuşma tanıma sistemi elde edilmiştir.	Çalışma kapsamındaki deneyler sırasıyla 46 dB ve 70 dB olan farklı iki gürültü senaryolarında gerçekleştirilmiştir. Önerilen tekniğin performansı, Microsoft ve Google ile karşılaştırılmıştır.	Önerilen tekniğin, %6 hata oranı ile diğer tekniklere göre daha iyi performans gösterdiği görülürken, Microsoft uygulama program arayüzü %14 ve Google uygulama program arayüzü %11 hata oranı ile sonuç vermiştir.
[41]	Bu çalışmada, İngilizce ASR sistemi oluşturmak için Kaldi konuşma tanıma araç setini kullanarak Dil Modeli ve Akustik Modelin oluşturulmasına çalışılmıştır.	Test verileri, kontrolsüz ortamlarda Karnataka çiftçilerinden toplanarak ASR modellerinin geliştirilmesi için kullanılmıştır. Toplanan konuşma verileri hazır bir araç kullanılarak metne aktarılmıştır.	Geliştirilen ASR modellerinin, çiftçilerin tarımsal emtia fiyatlarına ve hava durumu bilgilerine zamanında erişmelerini sağlayan sistemlerde kullanılabilceği belirtilmiştir.
[42]	Bu çalışmada Tayland'ın kuzeydoğusunda konuşulan Isan dili için otomatik bir rakam konuşma tanıma sistemi sunulmuştur. Konuşma özelliklerini çıkarmak için Mel frekanslı katsayılar tekniği ve konuşma tanıma için Saklı Markov modelleri kullanılmıştır.	Bu çalışmada yerli konuşmacılarından elde edilen bir Isan rakam (0-999) okunuş verisi toplanmıştır. Isan rakamlarını söyleyen konuşmacılar için izole edilmiş veriler ve sürekli konuşma tanıma görevi üzerine odaklanılmıştır.	Sadece rakamlar üzerine yoğunlaştığından başarımları yüksektir. Geniş kelime hazinesine sahip bir ASR ile karşılaştırılması mümkün değildir.
[43]	Bu çalışmada Saklı Markov modelleri kullanıcının sağladığı sesi tanımak için kullanılır. Soru cevaplama sistemi, ilgili belgeleri almak için Lucene arama motorundan vektör uzay modeli kullanılmıştır.	Bütün deneyler Endonezce üzerine yapılmıştır. Sistemi eğiten konuşma verileri tek bir kaynaktan alınmıştır. Sisteme giren toplam konuşma verileri 30 kelimelik kompozisyon ve her kelime 30 kez tekrarlanarak oluşturulmuştur.	Konuşma eğitim verilerinin miktarının arttırılması gerektiği belirtilmiştir. Ayrıca belge üzerinden alınacak cevabı görmek için sözdizimsel ve semantik yöntemlerin kullanılması sonuçları iyileştirebilir.

<i>Kaynak</i>	<i>Kullanılan yöntem</i>	<i>Uygulama alanı</i>	<i>Değerlendirme</i>
[44]	<i>Bu çalışmada açık kaynaklı Sphinx4 araç seti kullanarak sürekli ASR için Endonezce üzerine bir uygulama geliştirilmiştir</i>	<i>Çalışmada 407 cümleden oluşan bir metin derlemi ve 4070 konuşma dosyası kullanılmıştır. 10 Endonezyalı konuşmacı tarafından veri oluşturulmuştur.</i>	<i>Bu çalışmada kullanılan eğitim verisi sürekli konuşma tanıma işleminde yetersiz kalmaktadır. Verilerin çoğaltılması gerekmektedir.</i>

Literatürde ASR sistemlerinin çok farklı diller üzerine inşa edildiği görülmüştür. Ayrıca farklı dillerdeki konuşma tanıma görevleri için farklı ortam (gürültü veya diğer akustik parametreler) değerlendirmeleri için yapılan çalışmalar da mevcuttur. Galic ve arkadaşlarının gerçekleştirmiş olduğu kısık sesli konuşmaların tanınması çalışması [45], Shahnawazuddin ve arkadaşlarının gürültülü ortamlarda çocukların konuşmalarının tanınması için yaptıkları çalışma [46] örnek olarak verilebilir. Ayrıca, Google tarafından geliştirilen görsel ve işitsel bilgilerin aynı anda kullanıldığı bir projede gürültülü ortamlardaki konuşmaların daha yüksek başarı oranları ile metne aktarılması çalışılmıştır [47]. ASR işlemi konuşma-metin verileri ile birebir eşleştirilen görsel anlatım ile desteklenmiştir. Bu çalışma da ana sorun gürültülü bir ortamda (üst üste binen karşılıklı konuşmalar, alkış veya yüksek sesle konuşarak diğer konuşmaları bastırmak) geçen konuşmayı tanımlayabilmektir. Bu sorunu çözebilmek için gerçek hayatta olduğu gibi sadece bir konuşmacıya yoğunlaşarak ve konuşmacının yüz hareketleri ele alınarak bir ASR sistemi geliştirilmiştir. Böylelikle gerçek hayatta olduğu gibi gürültülü bir ortamda olursa dahi hem görsel iletişim hem de duyuşal iletişim ile ASR sistemlerinin başarımı arttırılmaya çalışılmıştır.

ASR sistemlerinin başarımını attırmaya dayalı çalışmalar yapılırken sadece yetersiz veri kaynağı değil yetersiz donanım kaynağı da bir sorun olarak karşımıza çıkmaktadır. ASR sistemlerinin gerçek hayattaki uygulamalarda çevrimiçi olarak kullanılması ve hesaplama yoğunluğunun GPU üzerine aktarılması ile yetersiz donanım sorunu nispeten giderilmiştir. Çevrimiçi kullanımda ASR için gerekli olan donanım kaynağı uzak ortamlarda bulunan güçlü sunucular ile sağlanmıştır. Ancak ASR için gerekli olan yüksek hesaplama ihtiyacı çevrimdışı sistemlerde hala bir sorun olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu nedenle çevrimiçi ASR sistemlerinin sunduğu yüksek hesaplama alt yapısı sayesinde bulut tabanlı ASR uygulamaları çoğalmış ve yaygınlaşmıştır.

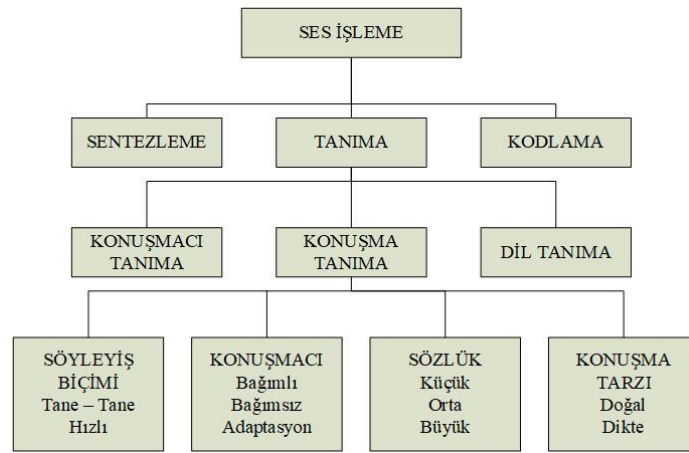
ASR sistemlerinin yaygınlaşması ve ekonomik kazanımların ortaya çıkması ile bu alana yapılan yatırımlar artmıştır. Amazon firması "Amazon Transcribe", Microsoft firması "Azure Bing Speech", Google firması "Cloud Speech-to-Text", IBM ise "Watson Speech-to-Text" projesini başlatmıştır [48]. Bu kapsamda bulut platformu üzerinden sunulan Uygulama Programlama Arayüzleri (API: Application Programming Interface) sayesinde farklı uygulamalar geliştirilmiştir. Özellikle Google'un sunduğu "Ok Google", Microsoft'un sunduğu "Cortana", IBM'in sunduğu "Watson" ve Apple'ın sunduğu "Siri" kişisel asistan uygulamaları en iyi örneklerdendir. Ayrıca bulut tabanlı ASR servis sağlayıcıları sundukları API'ler yardımı ile ASR sistemlerinin kullanımı yaygınlaştırmıştır. Ancak kullanıcılar bulut tabanlı ASR sistemlerinin gizliliğinden ve güvenliğinden tam anlamı ile emin değildirler. Bu nedenle çevrimdışı ASR sistemlerin yetersiz donanım kaynağına rağmen başarımlarını arttıracak yaklaşımlar gerçekleştirilmelidir [49].

ASR sistemleri üzerinden sadece konuşma bilgisinin metne dönüştürülmesi değil farklı çalışmalarda gerçekleştirilmiştir. Örneğin, konuşma duygusunun tanımlanması [50], [51], negatif etki ve saldırganlığın otomatik olarak tanımlanmasını sağlayan konuşma analizinin yapılması [52] ve cinsiyet tanınması [53] gibi çalışmalar da mevcuttur. Ayrıca aksan tanıma çalışmaları da ASR sistemlerinin başarımını arttırmada önemli rol oynayacağı gibi aynı zamanda konuşmacı hakkında detaylı bilgiler vermektedir [54]. Aksan tanıma çalışmalarında dil bilimsel bir yaklaşım izlenmektedir. Bir dile ait bir kelimenin okunuş biçiminde sergilenen morfolojik yaklaşım o konuşmacının konuştuğu aksan hakkında bilgiyi içermektedir [55]. Sagha ve arkadaşlarının yaptığı bir çalışmada ise konuşma bilgisi üzerinden yaş bilgisi, cinsiyet bilgisi ve konuşma bilgisinin ASR sistemleri üzerindeki performansı araştırılmıştır [56].

Güncel ASR sistemlerinin performanslarının gerçek kişilerin konuşma tanımına göre çok daha düşük olduğu bilinmektedir. Yapay sinir ağları, konuşma tanıma çalışmalarının erken evrelerinde başarıyı arttırmak için kullanılmıştır. Ancak bazı çalışmalarda konuşma verisinin elde edilmesinde özel koşullar oluşturulmuş ve bu konuşma verileri kullanılarak yapay sinir ağı ile konuşma tanıma gerçekleştirilmeye çalışılmıştır. Bu çalışmalardan Lin ve arkadaşlarının boğaz mikrofonu kullanan kişiler üzerine uyguladıkları ASR sistemi dikkat çekicidir [57]. Geleneksel bir akustik mikrofon sinyaline göre boğaz mikrofonunun işlenmesi zorlu bir görevdir. Bunun gibi zorlu görevlerin üstesinden gelebilmek için gerçekleştirilen ilk çalışmalar, zaman gecikmeli çok katmanlı yapay sinir ağlarının küçük harf grupları arasında ayrımcılık sağlayabileceğini göstermiştir.

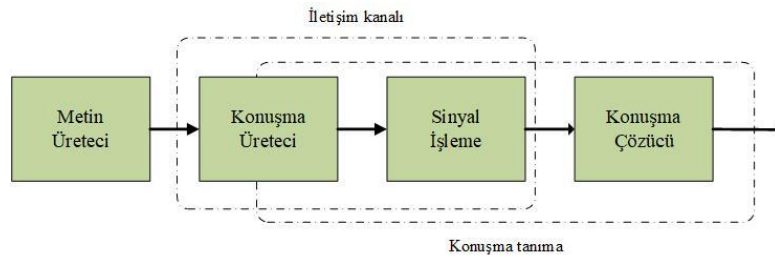
2. OTOMATİK KONUŞMA TANIMA SİSTEMLERİ (AUTOMATIC SPEECH RECOGNITION SYSTEMS)

ASR sistemleri, konuşmacıya bağımlılık, sözlük boyutu, konuşma biçimi ve konuşma türü açısından çeşitli sınıflarda incelenir [58]. Şekil 1'de genel olarak ses işlemedeki süreç ve ASR sistemlerinin sınıflandırılması verilmiştir.



Şekil 1. Ses işlemindeki süreç ve ASR sistemlerinin sınıflandırılması

ASR sisteminin görevi konuşma sinyalini birtakım algoritma ve modelleri kullanarak işleyip metine dönüştürmektir. Şekil 2'de gösterildiği gibi öncelikle konuşma tanıma işlemi için metin üretici aracılığıyla kaynak kelime dizisi hazırlanır. Kaynak kelime dizisi sisteme giriş olarak verilen konuşma bilgisinden üretilmektedir. Konuşma sinyalinin çıkarılması için kaynak dizisi hazırlanır. Farklı format veya kod yapısındaki konuşma bilgisi ilk giriş aşamasında istenilen diziyeye dönüştürülmektedir. Kaynak kelime dizisi konuşmanın ses dalgı formunu ve konuşma sinyali bileşenini üretmek için bir iletişim kanalından geçirilir. Son olarak konuşma kod çözücü sayesinde akustik sinyalin, orijinal kelime dizisine yakın olan en ideal kelime dizisi haline getirilmesi sağlanmaktadır [59].



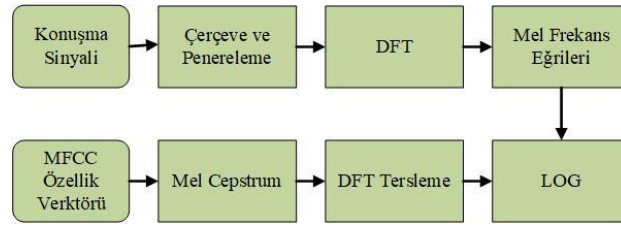
Şekil 2. Konuşma tanıma sistemi için kaynak-kanal modeli

Klasik bir konuşma tanıma sisteminin mimarisinde üç önemli bileşen bulunmaktadır (Şekil 3). Sistemin giriş noktası olan ilk aşamada, örüntü tanıma (pattern recognition) açısından önemli olan öznitelik vektörleri ön-uç bileşeni tarafından elde edilmektedir [60]. Daha sonra, deşifre (decoder) modülü akustik

dayanmaktadır. Bu nedenle her çerçeveden bir MFCC vektörü hesaplanmaktadır. MFCC, Denklem 2 kullanılarak hesaplanmaktadır [62].

$$\text{Mel}(f) = 2595 * \log_{10}\left(1 + \frac{f}{700}\right) \quad 2$$

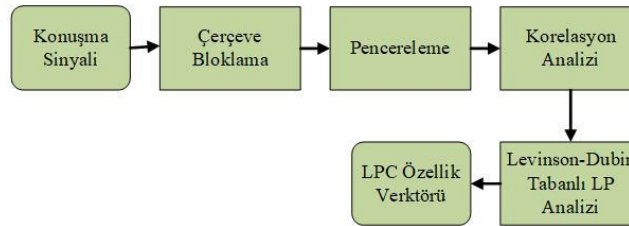
Cepstral katsayıları çıkarmak amacıyla konuşma örneği giriş olarak alınmakta ve sinyalin süresizliğini en aza indirmek için Hamming penceresi uygulanmaktadır. Bu pencereler daha sonra Mel filtre bankasını oluşturmak için Ayrık Fourier Dönüşümü (DFT: Discrete Fourier Transform) ile birlikte kullanılacaktır. Mel frekans eğrisine göre filtrelerin genişliği değişmekte ve böylece merkez frekansı etrafındaki kritik bant üzerindeki özellikler hesaplanmaktadır. Son olarak ise elde edilen katsayılar ters yönlü Fourier Dönüşüm katsayılarının hesaplanması için kullanılmaktadır [65]. MFCC özellik çıkarım işleminde yer alan adımlar Şekil 4'te gösterilmiştir.



Şekil 4. MFCC özellik çıkarım işlem adımları [62]

2.1.2. Doğrusal öngörülü kodlama (Linear predictive coding)

En güçlü sinyal analiz tekniklerinden biri olan Doğrusal Öngörülü Kodlama (LPC: Linear Predictive Coding,) konuşmanın temel parametrelerini tahmin etmek için kullanılmaktadır [66]. LPC'nin arkasındaki temel fikir bir konuşma özelliğinin geçmiş konuşma örneklerinin doğrusal bir kombinasyonu olarak tahmin edilebilmesidir. Gerçek konuşma örnekleri ile tahmin edilen değerler arasındaki kareler arası farkların en aza indirilmesiyle, benzersiz bir parametre ya da bağımsız katsayılar elde edilmektedir. Bu katsayılar konuşmanın LPC'si için temel oluşturmaktadır. Analiz işlemi zaman içindeki konuşmanın doğrusal tahmin modelini hesaplama yeteneğini sağlamaktadır [67]. LPC konuşma özellik çıkarım işleminde yer alan adımlar Şekil 5'te gösterilmektedir.



Şekil 5. LPC özellik çıkarım işlem adımları

2.2. Akustik Modelleme (Acoustic Modeling)

ASR sistemlerinin doğruluğunu arttırmak için, konuşmacı varyasyonları ve ortam varyasyonları önemlidir. Bir konuşma işleminin akustik modellenmesi, tipik olarak konuşma dalga formundan hesaplanan özellik vektör dizileri için istatistiksel bilgilerin oluşturulması işlemidir. Akustik modelleme, ASR'de gürültü sağlamlığının sağlanmasında, konuşmanın özellik vektörlerini yeniden şekillendirmek için tanıyıcıdan gelen geri bildirim bilgisinin kullanımını da içermektedir [68].

Akustik modellemede ilk olarak belirli zaman sinyali çerçevesindeki foneme ait sonsal olasılık hesaplanmaktadır. Tekrarlanan sinir ağı akustik model olarak kullanılır ise belirli bir zaman aralığında bir fonemin benzerlik olasılığını hesaplamak için sonsal olasılığı basit bir şekilde ön olasılığa bölerek elde edilebilir. Fonem sırası HMM Triphone yapısına birebir eşleştirilebilir. Genel olarak fonemlerin hizalanması normal Gauss dağılımını kullanarak elde edilmektedir [69]. HMM'de, durumlar arasındaki

geçişlerde Markov varsayımları yapılabildiği bir durumdan başka duruma geçişte sadece bir önceki durum göz önünde bulundurulmaktadır. Bu kısıtlama uzun kelime bağımlılığı olan dizilerin modellenmesini zorlaştırmaktadır. Ayrıca, HMM'deki durumların yayım olasılığı da birbirinden bağımsızdır. HMM temelinde bir zaman diliminin durumunu bir kez değiştiren sonlu durum makinesi olarak düşünülebilir. Çok sayıda HMM değerlendirme yöntemi, durum geçiş olasılıklarının ve HMM'nin her bir durumundaki yayılma olasılık yoğunluklarının parametrelerinin değerlerini tahmin etmek için geliştirilmiştir.

Akustik modelleme Derin Sinir Ağları (DNN: Deep Neural Network) ile de oluşturulabilmektedir [70]. DNN tabanlı akustik modelde fonemlerin sonsal olasılığı her bir pencere için bağımsızdır. Bu bağımsızlık kelimedeki bulunan fonemlerin birbirinden bağımsız olması anlamına gelmektedir. DNN tabanlı akustik modelde, ses niteliklerini alarak bu özelliklere bir fonem etiketi tahsis edilmektedir. Temelde her HMM durumunun gözlem olasılığı Gauss karışımları kullanılarak hesaplanmaktadır. Ancak DNN tabanlı akustik model durumunda, her HMM triphone durumunun bu gözlem olasılığı, DNN kullanılarak hesaplanmaktadır.

2.3. Dil Modelleme (Language Modeling)

Dil modelleme, dildeki kelimelerin dizilişini akustik özelliklerinden tamamen bağımsız olarak modellemektedir. Genel olarak n-gram tabanlı modelleme yöntemi kullanılmaktadır. Bu modeller de Markov varsayımı bulunup genelde 2 ile 4 arası geçmişteki kelime sırası göz önünde bulundurularak olasılık hesaplamaları gerçekleştirilmektedir [71]. Dolayısıyla, uzun bir cümledeki kelimelerin dizilişini modellemek n-gram'lar ile mümkün olmayıp sadece kısıtlı kelime geçmişi modellenmektedir. İleri beslemeli sinir ağını kullanan dil modellerinde Markov varsayımı bulunmadığı için bu modeller ile kelimelerdeki uzun bağımlılıklar modellenmektedir [72].

Dil Modeli, bir dildeki kelimelerin ve cümlelerin yapısı ve sırasını modelleyerek o dile ait bir istatistiksel model üretmektedir [73]. En basit ifade ile dil modeli bir kelime diziden sonra hangi kelimelerin gelebileceğini modelleyip deşifre zamanında olası dizilişleri üretmektedir. Gerçekçi bir istatistik elde etmek için olasılık hesaplamaları yeterince büyük metin verileri kullanarak yapılmalıdır. Bu veriler genelde çevrimiçi gazetelerden, elektronik kitaplardan ve dijital metin içeren farklı kaynaklardan elde edilip bazı ön işlemlerden sonra eğitim verisi olarak kullanılmaktadır.

Dil modeli eğitilirken metin verisi içerisinde çok sık geçen kelime dizilerinin olasılık değeri seyrek geçen kelime dizilerine göre daha yüksek çıkıp sistemin çıktısını da bu yönde etkilemektedir. Bu tür sorunları çözmek için dil modeli üzerinde düzleme yöntemleri uygulanmaktadır [74]. Düzlemedeki amaç olasılığı çok yüksek olan n-gram'ların olasılık değerini biraz düşürürken olasılığı düşük olan n-gram'ların ise olasılık değerini artırmaktır. Ayrıca, metin derlemi içerisinde hiç geçmeyen n-gram'lar için mevcut olasılıkları kullanarak bir olasılık hesabı yapılabilmektedir [75].

2.4. Okunuş Sözlüğü (Lexicon)

Sözlük içerisinde konuşma tanıma sisteminin tanınması gereken sözcükler yer alıp sistemin kullanım alanına göre sözlükteki kelime sayısı değiştirilebilmektedir. Büyük sözlüklü ASR sistemlerinde yüzbinlerce kelimenin farklı okunuşları yer almaktadır [76]. Sözlük hazırlama aşaması, HMM tabanlı konuşma tanıma sistemlerinin tasarlanması sürecindeki önemli adımlardan birisidir. Sözlük dışı kelimelerin azaltılması ve gereksiz kelimelerin sözlükte bulundurulmaması arasında bir denge kurulması gerekmektedir.

Okunuş sözlüğündeki tüm kelimelerin okunuşu fonetik semboller ile belirlenip her bir HMM bu sembollerden birisini ifade ederek modellemektedir. Türkçe, yazıldığı gibi okunan bir dil olduğu için sözlük hazırlama süreci daha kolay olup kelimedeki harfler fonetik sembol olarak da kullanılabilir. Aynı kelime farklı şekillerde okunabildiği için sözlükte bulunan her kelimenin çeşitli okunuş şekilleri fonetik olarak belirtilmelidir. Ayrıca, yabancı kelimeler ve kısaltmalar gibi kelimelerin de yazılışı ile okunuşları farklı olabileceği için bütün bu okunuşlar sözlükte bulunmalıdır. Genel bağlam için hazırlanan sözlükler genelde büyük metin derleminden elde edilen tekil kelime listesinden oluşmaktadır. Kelimeler dil bilim uzmanları tarafından incelenip farklı okunuş ve yazılışları ile sözlüğe dâhil edilmektedir. Dâhil edilen

kelimelerde imla kurallarının doğru olması gerekir. Güncel konuları içermesi gerekir. Bu nedenle geniş konuşma haznesinde olması gereken kelimeler sisteme eklenmelidir.

2.5. Deşifre (Transcription)

Bir ASR çalışmasında akustik ve dil modelleme giriş özellik vektörleri sırasına göre en iyi konumlanan bir kelime dizisi sunmaktadır. Bu nedenle eğitilmiş akustik ve dil modelleri ile birlikte bir deşifre işleminin süreci genellikle bir arama işlemi olarak adlandırılabilir [77]. ASR sistemlerinde kullanacak arama algoritmasının karmaşıklığı, dil modellemenin getirdiği kısıtlamalarla belirlenen arama alanıyla yüksek oranda ilişkilidir. Sonlu durum dilbilgileri ve n-gramlar dâhil olmak üzere farklı dil modellerinin etkisi kod çözme verimliliğinde kritik öneme sahiptir. Kod çözücüsü konuşmayı soldan sağa bir süreç olarak işaret eden bilgileri ve zamana bağlı bir süreç tarafından sağlanan verimliliği içermektedir.

Deşifre akustik ve dil modellemeden çıkan ve en uygun arama işlemini gerçekleştiren aynı zamanda büyük arama alanlarını ele alma yeteneğini barındıran bir bileşendir [78]. Deşifre sırasındaki amaç elde edilen X sinyaline ait en olası W kelime sırasını bulmaktır. Ancak gerçek uygulamalarda akustik modelin tek başına kullanılması kelime hata oranını oldukça yükseltmektedir. HMM tabanlı konuşma tanıma sistemlerinin başarısı daha çok dil modeline bağımlı kalmaktadır. Dolayısıyla, oldukça güçlü bir dil modelinin eğitilmesi doğruluk oranı yüksek bir konuşma tanıma sistemi elde etmek için zorunlu hale gelmektedir.

Deşifre işlemlerinde kullanılan Zamansal Bağlantılı sınıflandırma (CTC: Connectionist Temporal Classification) algoritması, hizalama çıktısındaki bir alt sembolü ile x dizisi arasında bağımsızlık varsayımını temel almaktadır [79]. Girdi ile çıktı arasında derin bir yapı olsa bile girdi ile çıktı arasında güçlü bir Markov varsayımı bulunmaktadır. Bir çerçeve üzerindeki tahmin ile komşusundaki çıktı arasında koşullu bağımsızlık mevcuttur. Bu nedenle CTC algoritması çıktısındaki sembollerin öğrenemeyip deşifre aşamasında güçlü bir dil modeline ihtiyaç duymaktadır.

3. KONUŞMA TANIMA ZORLUKLARI VE GELECEK ARAŞTIRMALAR (SPEECH RECOGNITION CHALLENGES AND FUTURE RESEARCHES)

Konuşma tanıma, teknik zorluklarla dolu bir çalışma alanını içermektedir. Yapılan araştırmalarda iki temel zorluk üzerinde durulmaktadır. Bunlardan ilki gürültülü ortamlardaki konuşmaların tanınması diğeri ise doğal serbest stil konuşma tanımadır. Bu zorluklar üzerine çalışmalar sürekli olarak devam etmektedir.

3.1. Akustik Ortamlara Karşı Dayanıklılık (Resistance to the Acoustic Environment)

Güncel konuşma tanıma sistemleri sağlam bir istatistiksel çerçeve üzerine inşa edilmiştir. İstatistiksel çerçeveler doğal konuşma verilerinde meydana gelen değişkenliği temsil etmektedir [80]. Sisteme daha önce verilen örnek konuşma verisinden tahmin edilen parametreler yardımıyla olasılık modelleri hazırlanmaktadır. ASR sistemlerinin altında yatan temel sorun, doğal konuşma sinyalinde var olan değişkenliğin (ortam, gürültü, aksan, konuşmacı, mikrofon vb.) karmaşıklığıdır [81].

Konuşma sinyalinde, dil bilgisine yabancı olan yaygın çeşitlilik, akustik ortamdan kaynaklanmaktadır. Konuşmanın gerçekleştiği akustik ortam ve konuşma sinyalinin ön işlemden önce iletişimi kanalı, sistem performansının önemli ölçüde bozulmasından sorumludur. Mevcut teknikler, ham gürültü veya doğrusal çarpıklıkların neden olduğu değişkenliği azaltabilmekte ve yavaşça değişen doğrusal kanalları telafi edebilmektedir [82]. Bununla birlikte yankılanma ya da hızlı değişen gürültü gibi daha karmaşık kanal çarpıklıkları ve ayrıca Lombard etkisi gelecekteki araştırmalarda üstesinden gelinmesi gereken önemli bir zorluk olarak görülmektedir.

Konuşmacı özelliklerinin konuşmacı fizyolojisi, konuşmacı tarzı ve aksanları içeren birçok faktör nedeniyle konuşmacılar arasında büyük ölçüde değiştiği bilinmektedir [83]. Konuşma tanıma sistemlerini mikrofon karakteristiğindeki değişikliklere karşı daha güçlü kılmak için kullanılan birincil yöntem model eğitiminde kullanılan verilerin çok sayıda farklı konuşmacılar içermesidir. Ayrıca mevcut ASR sistemleri, bir dilin ana konuşmacılarını ve dilin çeşitli ana dil konuşanlarından gelen çok sayıda konuşma verisini

modelleyen bir okunuş sözlüğü varsaymaktadır. Okunuş sözlüğü ile desteklenmeyen sadece uçtan uca akustik modelleme ile yapılan ASR sistemlerinin başarımı okunuş sözlüğü kullanan sistemlere göre düşük olacaktır.

Konuşma tanıma sistemlerindeki teknik zorluk, akustik ortamlardaki değişiklikler, yankı, dış gürültü kaynakları ve iletişim kanalları da dâhil olmak üzere her türlü değişkenliğe karşı daha güçlü olan ASR sistemlerinin oluşturulmasını ve geliştirilmesini gerektirmektedir. Bu önemli konular için yeni teknikler ve mimariler geliştirilmelidir. Günümüzün ASR sistemlerinde kullanılan akustik modeller, çalışma kapsamında açıklanan akustik değişkenliğin altında yatan nedenlerin çoğunu barındırmaktadır.

Sonuç olarak bir konuşma tanıma sistemine sunulan konuşma, parametre tahmininde kullanılan eksenlerden biri boyunca saptığında, modellerin tahminleri oldukça şüpheli hale gelmektedir. Bu değişkenlik faktörlerine karşı ASR sistemlerinin sağlamlığı bu alanda önemli bir teknik zorluk teşkil etmektedir. Bu zorluğun giderilmesi yalnızca konuşma değişkenliğinin gerçek doğası için açık mekanizmaları akıllıca temsil edebilen yenilikçi mimariler ve teknikler kullanmak ile mümkün değildir. Daha da önemlisi ASR modellerini geçmişte mümkün olmayan çok katmanlı şekillerde eğitmek ve uyarlamak için mevcut olan ve sürekli artan verileri ASR sistemlerinin kullanacağı şekle getirilmesi ile teknik zorlukları aşabilmek mümkün olacaktır.

3.2. ASR'de Kendi Kendine Öğrenme (Self-Learning in ASR)

ASR için konuşma-metin eşleştirmesi yapılmış eğitim verileri ve telaffuz edilen kelimeler, gerçek kullanıcılar tarafından sağlanmaktadır [84]. Bu verilerden elde edilen bilgilerden istatistiksel modeller üretilmektedir. Bu yaklaşım ile geliştirilen ASR sistemlerinin başarımı giderek düşmektedir. Başarımı arttırmak için ise tekrar gerçek kullanıcıların müdahalesi gerekmektedir. Konuşmanın doğal dengesi göz önüne alındığında bu sürecin sonsuza kadar devam etmesi muhtemeldir. Buradaki zorluk, konuşma tanımayı insanın kendi kendine öğrenme kabiliyetinin en azından temel bir biçimiyle donatacak olan kendi kendini uyarlama veya kendi kendine öğrenme teknikleri oluşturmaktır.

Değişen ortamlar, konuşulmayan ifadeler, farklı konuşmacılar, farklı telaffuzlar, lehçeler, aksanlar, kelimeler, anlamlar ve konularla başa çıkabilmek için konuşma ve dil işlemenin her seviyesinde öğrenmeye ihtiyaç duyulmaktadır. Bu alandaki araştırmalar hem yeni modellerin öğrenilmesini hem de bu modellerin önceden var olan bilgi kaynaklarına entegrasyonunu ele almaktadır [85]. Örneğin, bir ASR sisteminin giriş konuşmasında yeni bir özel isimle karşılaşabilir ve özel ismin yazımını bulabilmek için eş zamanlı metni uygun içerikle incelemeye ihtiyaç duyulabilir. Etiketlenmemiş veya kısmen etiketlenmiş verilerin kullanılması bu tür bir öğrenme için gerekli olacaktır. Tanınamayan kelimelerin işaretlenmesi otomatik veya el yordamı ile yapılabilir. Burada kendine özgü öğrenme yaklaşımları geliştirilebilir. Ayrıca genelleme yapılabilir. Genelleme yaklaşımı konuşma tanıma sistemlerinde hızı arttıran farklı yaklaşımlardan biri olarak görülmektedir.

3.3. Bilinmeyen Kelimelerin Tespiti ve Yetersiz Kaynak Durumu (Detection of Unknown Words and Insufficient Resource Status)

ASR sistemleri zengin kelime haznesi ve sondan eklemeli yapıya sahip dillerde üretilen kelimeleri tahmin etmekte zorluk çekmektedir. Bu durum kelime haznesi, yabancı veya eğitim kümesinde yer almayan kelimeleri içeren konuşmalarda başarımı düşürmektedir. Bilinmeyen kelimelerin tespiti ASR sisteminin kelime haznesini ve okunuş sözlüğünü oluşturmak için yetersiz kaynak bulunan dillerde büyük bir sorundur. Bu konudaki temel sorun yüksek olasılık değerine sahip kelime terimlerinin diğer ortak ve benzer kelimeleri yanlış tanımlamasıdır [86]. Çözümünden istenilen amaç ise bir kelime ASR sistemine daha önce eğitim verisi olarak verilmediyse bu kelimeyi güvenilir bir şekilde tahmin eden sistemler oluşturmaktır. Bu nedenle dil modelleme ve okunuş sözlüğü büyük önem arz etmektedir. Ayrıca bu tür durumların tespiti için sistemin kelime hipotezinin güvenilir olduğu varsayılmalı ve hata düzeltme planlarının tasarlandığından emin olunması gerekmektedir.

3.4. ASR için Hesaplamalı Mimariler (Computational Architectures for ASR)

Bilgisayar donanım alt yapıları gelişmekte ve veri gereksinimi olan sistemler için hesaplama veya depolama ihtiyaçları giderilmektedir [87]. ASR sistemleri üzerinde yapılan çalışmalar daha büyük eğitim veri setlerinin kullanılması gerektiğini belirtmektedir. Büyük veri setlerinin işlenmesi hesaplama yoğunluğu arttırmaktadır. Mevcut mikroişlemcilerdeki güç ve hesaplama seviyelerinin düşüklüğü nedeniyle büyük veri setleri mikroişlemciler üzerinde işletilememektedir. Mikroişlemciler üzerinde veri setlerini işletebilmek için hesaplama kümelerinin azaltılması gibi farklı yaklaşımlar sergilense de bu işlemler uzun zaman aldığından tercih edilmemektedir. Bu durumda paralel işletim yeteneğine sahip sistemler üzerinde çalışmak performansı arttıracaktır. Çoğu zaman konuşma sistemleri için algoritma tasarımcıları bu paralellik araştırmasını göz ardı etmektedirler. Odaklanılan tek sorunu başarıyı arttırmak olarak nitelendirmişlerdir. Gelecekteki araştırma önerileri ve bu çalışmada tartışılan yaklaşımlar daha fazla hesaplama birimi gerektirecektir. Sonuç olarak ASR ile ilgili araştırmacılar, tasarımlarında paralellik yaklaşımını düşünmek zorundadır. Ayrıca mikroişlemci tabanlı yaklaşımlar yerine grafik işlemciler üzerinde hesaplama işlemlerini yapmalıdırlar.

3.5. Türkçe ASR'nin Geniş ve Sınırlı Dağarcık Düzeyindeki Başarısı (The Success of Turkish ASR at Wide and Limited Vocabulary)

ASR sistemlerinde dağarcık sistemin tanıyabileceği kelimeleri ifade etmektedir. ASR sisteminin tanıyamadığı kelimeler dağarcık dışı olarak kabul edilir. Her bir dağarcık dışı kelime konuşma tanımada ortalama 1.5 hata oranına yol açmaktadır [88]. Literatürdeki çalışmalar sınırlı dağarcığa sahip ASR sistemlerinin daha doğru sonuçlar verdiğini göstermektedir [89]. Yer isimleri veya rakamlardan oluşan sınırlı dağarcığa sahip konuşmalarda kelime hata oranları %1, yer isimlerinden oluşan cümlelerde ise kelime hata oranı yaklaşık %4 civarındadır. Geniş dağarcığa sahip konuşmalar ile yapılan deneylerde ise kelime hata oranları çok daha yüksek çıkmaktadır. Aksoylar ve arkadaşlarının gerçekleştirdiği çalışmada geniş dağarcığa sahip konuşma tanıma sistemi spor haberleri ile test edilmiş ve %46'lık bir kelime hata oranının tespit edildiği gösterilmiştir [89]. Parlak ve arkadaşlarının gerçekleştirdiği çalışmada ise eğitim ve test işlemlerinde aynı veri kümesinin parçaları kullanılmıştır [90]. Bu kullanım şeklinde kelime hata oranı %26.9 olarak belirlenmiştir. Eğitim işleminde 184 saatlik test işleminde ise 3 saatlik bir veri kullanılmıştır. Bu çalışma Türkçe için gerçek anlamda bir geniş kelime dağarcığına sahip değildir.

Akın ve arkadaşlarının gerçekleştirdiği çalışmada önceki çalışmalardan farklı olarak kelime altı birimler bulunurken kelimeler öncelikle bir biçimbirimsel çözümleyiciden geçirilmiştir [91]. Türüne göre sınıflara ayrılıp kelimeler daha sonra biçimbirimsel tabanlı yâda istatistiksel yöntem kullanılarak kelime altı birimler elde edilmiştir. Yaklaşık 60 saatlik bir konuşma verisi kullanılarak akustik model ve yaklaşık 614 milyon kelimedenden oluşan bir dil modeli hazırlanarak bir ASR sistemi geliştirilmiştir. Toplam %6,2 dağarcık dışı kelimenin olduğu bir test verisinde %24,16'lık bir kelime hata oranı veren bir test işlemi gerçekleştirilmiştir. Farklı deneylerde dağarcık dışı kelimelerin azalması ile sistemin başarımının arttığı gözlemlenmiştir. Ancak bir ASR sisteminden istenilen hangi dil üzerine geliştiriliyor ise o dildeki bütün kelimeleri rahatlıkla tanıyor olmasıdır. Ancak bu durum sondan eklemeli bir yapıya sahip diller için oldukça zorlu bir görevdir. Bu nedenle geniş kelime dağarcığına sahip veri setlerinin hazırlanması gerekmektedir.

3.6. Türkçe ASR'nin Geleceği (The Future of Turkish ASR)

Yapılan araştırmalar sonucu Markov sürecindeki geçiş oranlarının Türkçe konuşma tanıma sistemlerinin performansını ve davranışını belirlemek için kolaylıkla kullanılacağı sonucuna varılmıştır. Ani ortam değişikliklerinin meydana getireceği güç değişkenlikleri, ağ kontrol sistemleri ve üretim sistemlerinde bulunan bazı pratik yöntemleri modellemek için en uygun yaklaşımlar Markov modellerinde mevcuttur [92]. Markov zincirleri, gürültü modellemesi ve konuşma sinyalinin tahmini için etkili bir şekilde uygulanmaktadır.

Bu çalışmada ele alınan ASR sistemin bileşenleri (akustik modelleme, dil modelleme ve deşifre) modern konuşma tanıma sistemlerinde yer almaktadır. Türkçe ASR için bu bileşenlerin her birinin ve okunuş sözlüğünün önemli katkısı olacaktır. Çok sayıda yeni kelimenin tek bir kökten meydana gelmesi Türkçenin morfolojik karakteristiğidir. Türkçe dilinin sondan eklemeli yapısı, kelime dağarcığını genişletmektedir.

Kelime sırasının düzensizliği, eğitim için gerekli olan veri kümesinin azlığı Türkçe ASR sistemlerinin geliştirilmesinin önünde önemli bir sorundur. Veri kümesinin azlığı ve kelime dağarcığının geniş olması dil modelinin olasılık tahminlerinde başarısız olmasına sebep olmaktadır. Bu durumda Türkçe için öncelikle geniş kelime hazinesine sahip eğitim veri setlerinin hazırlanması ve ardından istatistiksel modeller üzerine çalışmaların gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Böylelikle Türkçe dil yapısı modellenilebilecek ve başarıyı daha yüksek ASR sistemleri geliştirilebilecektir.

Gelecek çalışmalarda özellikle mobil iletişim ve çok kullanıcı arabirime sahip yayın organları üzerinden elde edilen verilerin Türkçe ASR sistemlerinde kullanılması ile daha güçlü Türkçe ASR sistemlerinin geliştirileceği tahmin edilmektedir. Dolayısıyla gelecek yıllarda Türkçe ASR sistemlerinin başarılarını arttırmaya ve hesaplama zamanının azaltılmasına yönelik birçok çalışma yapılacağı ön görülmektedir.

4. SONUÇ VE ÖNERİLER (CONCLUSION AND SUGGESTIONS)

Bu çalışmanın amacı, mevcut konuşma tanıma yöntemlerini ve yaklaşımlarını inceleyerek bu alandaki gelişmeleri detaylı olarak sunmaktır. Bu nedenle çalışma kapsamında araştırmacıların bu alanda yaptıkları çalışmalarda kullandıkları ölçütler, yaklaşımlar, veri setleri ve bu alanda karşılaştıkları zorluklar ele alınmıştır. ASR çalışmaları incelenirken ASR'nin uygulama alanı, kullanılan materyal ve metotlar dikkate alınmıştır. Ayrıca başarımlar ölçütlerinde kullanılan teknikler açıklanmıştır. Araştırmacıların hangi dil üzerine çalıştığı ve bu dil üzerindeki zorluklar belirtilmiştir. Türkçe üzerine geliştirilen çalışmalarda karşılaşılan zorluklar verilmiştir. Araştırmalar sonucu elde edilen bilgiler doğrultusunda; akustik ortamlara karşı dayanıklılık, ASR'de kendi kendine öğrenme, bilinmeyen kelimelerin tespiti, Türkçe ASR'nin geniş ve sınırlı dağarcık düzeyindeki başarısı, yetersiz kaynak durumu ve ASR üzerine uygulanabilecek hesaplamalı mimariler üzerine değerlendirmelere yer verilmiştir. Ayrıca Türkçe ASR'nin geleceği tartışılmış ve Türkçe ASR için mevcut zorlukların üstesinden gelebilmek amacıyla önerilerde bulunulmuştur. Derin öğrenme ve klasik yaklaşımların ASR üzerine etkisi araştırılmıştır. Araştırmacıların bu alandaki çalışmaları için gerekli olan detaylı bilgiyi kendi çalışmalarına dâhil edebilmesi ve mevcut zorlukların üstesinden gelebilmesi için bir yol haritası sunulmuştur.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışma, EMFA Yazılım Danışmanlık A.Ş. tarafından desteklenmiştir. Desteklerinden dolayı EMFA Yazılım Danışmanlık A.Ş. yönetim kurulu başkanı Emre EVREN'e teşekkürlerimizi sunarız.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Moore, R. K. (2007). Presence: A human-inspired architecture for speech-based human-machine interaction. *IEEE Transaction Computer*, 56(9), 1176-1188.
- [2] Ghorbel, M., Haariz, M., Grandjean, B., & Mokhtari, M. (2005). Toward a generic human machine interface for assistive robots: The amor project. *International Conference Rehabilitation Robotics*, 68-172.
- [3] Abushariah, M., Gunawan, T. S., Khalifa, O. O., & Abushariah, M.A.M. (2010). English digits speech recognition system based on hidden markov models. *International Conference Computer Communication Engineering*, 1-5.
- [4] Kurian, C., & Balakrishnan, K., (2009). Speech recognition of Malayalam numbers. *World Congress National Biology Inspired Computer NABIC*, 1475-1479.
- [5] Paraiso, E. C., & Barthès, J. P. A. (2006). An Intelligent speech interface for personal assistants in R&D projects. *Expert System Application*, 31(4), 673-683.
- [6] Busso, C. (2004). Analysis of emotion recognition using facial expressions, speech and multimodal

- information. International Conference Multimodal Interfaces, 205-212.
- [7] Myakotnykh, E. S., & Thompson, R. A. (2009). Adaptive Speech quality management in voice-over-ip communications. Advanced International Conference Telecommunication, 64-71.
- [8] Xiao, Q. (2007). Biometrics-technology, application, challenge, and computational intelligence solutions. IEEE Computer Intelligence Magazine, 2(2), 5-10.
- [9] Prakoso, H., Ferdiana, R., & Hartanto, R. (2017). Indonesian automatic speech recognition system using CMUSphinx toolkit and limited dataset. International Symposium Electronic Smart Devices, 283-286.
- [10] Miao, Y. (2014). Kaldi+PDNN: Building DNN-based ASR Systems with Kaldi and PDNN. IEEE Computer Intelligence Magazine, 14(6), 1-4.
- [11] Greibach, S. (2010). A mixed trigrams approach for context-sensitive spell checking. Lecture Notes in Computer Science, 939-953.
- [12] Salor, O., Pellom, B., Ciloglu, T., Hacıoglu, K., & Demirekler, M. (2002). On developing new text and audio corpora and speech recognition tools for the Turkish language, International Conference Spoken Language Processing, 349-352.
- [13] Salor, O., Ciloglu, T., Hacıoglu, K., & Demirekler, M. (2002). On developing new text and audio corpora and speech recognition tools for the Turkish language. International Conference Spoken Language Processing, 367-372.
- [14] Salor, Ö., Pellom, B., Ciloglu, T., & Demirekler, M. (2007). Turkish speech corpora and recognition tools developed by porting SONIC: Towards multilingual speech recognition. Computer Speech Language, 21(4), 580-593.
- [15] Arisoy, E., Can, D., Parlak, S., Sak, H., & Saraclar., M. (2009). Turkish broadcast news speech and transcripts. IEEE Transactions on Audio Speech and Language Processing 17(5), 874 - 883.
- [16] Coltekin, C. (2010). A freely available morphological analyzer for Turkish. International Conference Language Resource Evaluation, 820-827.
- [17] Jeanmonod, D., Rebecca, J., & Suzuki, K. (2018). Control of a proportional hydraulic system, Intech Open, 2(1), 64-72.
- [18] Brown, P. F., Della Pietra, V. J., deSouza, P. V., Lai, J. C., & Mercer, R. L. (1990). {Class-Based} {N-Gram} Models of natural language. Computer Linguistic, 18(1950), 14-18.
- [19] Burrell, A. T., & Papantoni-Kazakos, P. (2012). Stochastic binary neural networks for qualitatively robust predictive model mapping. Communication Network System Science, 5(9), 603-608.
- [20] McCulloch, W. S., & Pitts, W. (1943). A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. Bulletin of Mathematical Biophysics, 5(4), 115-133.
- [21] Rosenblatt, F. (1958). The perceptron: A probabilistic model for information storage and organization. Psychology Revulation, 65(6), 386-408.
- [22] Rumelhart, D. E., Hinton, G. E., & Williams, R. J. (1986) Learning representations by back propagation errors. Natural Product Letters, 5(3), 533-536.
- [23] Waibel, A., Hanazawa, T., Hinton, G., Shikano, K., & Lang, K. J. (1989). Phoneme recognition using time-delay neural networks. IEEE Transaction Acoustic, 37(3), 328-339.
- [24] Hinton, G., & Shikano, I. C. (1988). Phoneme recognition: neural networks vs hidden markov models. ATR Interpreting Telephony Research Laboratories, 07-110.
- [25] Hochreiter, S., & Schmidhuber, U. J. (1997). Lstm. Neural Computing, 9(8), 1735-1780.


- [26] Arisoy, E., & Saraclar, M. (2016). Compositional neural network language models for agglutinative languages. Annual Conference International Speech Communication Association, 3494-3498.
- [27] Bengio, Y., Lamblin, P., Popovici, D., & Larochelle, H. (2007). Greedy layer-wise training of deep networks. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 19(1), 153-162.
- [28] Morandi, A. (2012). A fast learning algorithm for deep belief nets geoffrey. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 425(3), 2069-2082.
- [29] Raina, R., Madhavan, A., & Ng, A. Y. (2009). Large-scale deep unsupervised learning using graphics processors. *International Conference on Machine Learning*, 873-880.
- [30] Kımanuka, U. A., & Büyük, O. (2018). Turkish speech recognition based on deep neural networks .*Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 22(Özel), 310-319.
- [31] Fohr, D. (2017). New paradigm in speech recognition. *Deep Neural Networks*, Hal Id: hal-01484447.
- [32] Arisoy, E., & Arslan, L. M. (2005). Turkish dictation system for broadcast news applications. *European Signal Processing Conference*, 1351-1354.
- [33] Rosdi, F. (2017). Assessing automatic speech recognition in measuring speech intelligibility : a study of malay speakers with speech impairments. *International Conference on Electrical Engineering and Informatics*, 1-6.
- [34] Baniardalan, F., & Akbari, A. (2017). A weighted denoising auto-encoder applied to mel sub-bands for robust speech recognition. *Iranian Conference on Intelligent Systems and Signal Processing*, 38-42.
- [35] Tong, R., Wang, L., & Ma, B. (2017) Transfer learning for children's speech recognition. *International Conference on Asian Language Processing*, 36-39.
- [36] Guglani, A. N., & Mishra, J. (2018). Continuous Punjabi Speech recognition model based on kaldı ASR toolkit. *International Journal of Speech Technology*, 5:(6), 1-6.
- [37] Song, X., Zonu, Y., & Chen, S.(2017). Investigating multi-task learning for automatic speech recognition with code-switching between Mandarin and English. *International Conference on Asian Language Processing*, 27-30.
- [38] Lunuwilage, K., Abeysekara, S., Witharama, L., & Mendis, S. (2017). Web based programming tool with speech recognition for visually impaired users. *International Conference on Software, Knowledge, Information Management and Applications*, 1-6.
- [39] Battenberg, E. (2017). Exploring neural transducers for end-to-end speech recognition. *Computation and Language*, 206-213.
- [40] Sirikongtham, P. (2017). Improving speech recognition using dynamic multi - pipeline API. *International Conference on ICT and Knowledge Engineering*, 234-240.
- [41] Thimmaraja, Y. G., & Jayanna, H. S. (2017). Creating language and acoustic models using kaldı to build an automatic speech recognition system for Kannada language. *IEEE International Conference Recent Trends Electronic Information Communication Technology*, 161-165.
- [42] Sasithon, P. S. (2017). Isarn digit speech recognition using HMM. *International Conference Informatic Technology*, 1-5.
- [43] Ho, H., Mawardi, V. C., & Dharmawan, A. B. (2017). Question answering system with hidden markov model speech recognition. *International Conference on Science in Information Technology*, 257-262.
- [44] Syadida, A. Q., Ignatius, D. R., Setiadi, M., & Setyono, A. (2017). Sphinx4 for indonesian

- continuous speech recognition system. International Seminar on Application for Technology of Information and Communication. 264-267.
- [45] Gali, J., Šumarac, D., Jovi, S. T., & Markovi, B. (2017). Prepoznavanje bimodalnog govora bazirano na metodi potpornih vektora. *Telecommunications Forum*, 73-76.
- [46] Shahnawazuddin, S., Deepak, K. T., Pradhan, G., & Sinha, R. (2017). Enhancing noise and pitch robustness of children's ASR. *India Department of Electronics and Communication Engineering*, 5225-5229.
- [47] Ephrat, A. (2018). Looking to listen at the cocktail party: a speaker-independent audio-visual model for speech separation. *ACM Transaction Graphics*, 37(4), 1-11.
- [48] Cloud Comparison RightScale, <https://resources.flexera.com/web/www/cloud-comparison-tool/index.html>.
- [49] Bumbalek, Z., Zelenka, J., & Kencl, L. (2012). Cloud-based assistive speech-transcription services, Springer Berlin, 113-116.
- [50] Yu, B., Li, H., & Fang, C. (2012). Speech emotion recognition based on optimized support vector machine, *Journal of Software*, 7(12), 2726-2733.
- [51] Sivanagaraja, T. Ho., M. K. M. K., Khong, M. K., & Wang, Y. (2017). End-to-end speech emotion recognition using multi-scale convolution networks. *Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference*, 1-4.
- [52] Lefter, I., & Jonker, C. M. (2017). Aggression recognition using overlapping speech. *Seventh International Conference on Affective Computing and Intelligent Interaction*, 299-304.
- [53] Engineering, E., Mara, U. T., & Pauh, P. (2017). Automatic gender recognition using linear prediction coefficients and artificial neural network on speech signal, *IEEE International Conference on Control System, Computing and Engineering*, 24-26.
- [54] Wai K. L., & Fung, P. (1999). Fast accent identification and accented speech recognition. *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 221-224.
- [55] Fung, P. (1999). Fast accent recognition. *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 225-229.
- [56] Sagha, H., & Deng, J. (2017). The effect of personality trait, age, and gender on the performance of automatic speech valence recognition. *Seventh International Conference on Affective Computing and Intelligent Interaction*, 86-91.
- [57] Lin, S., Tsunakawa, T., Nishida, M., & Nishimura, M. (2017). DNN-based feature transformation for speech recognition using throat microphone. *Asia-Pacific Signal Information Processing Association*, 1-4.
- [58] Shafran, I., Rose, R., Park, F. (2003). Robust speech detection and segmentation for real-time ASR applications. *Izhak Shafran & Richard Rose Labs Research*, 432-435.
- [59] Ochiai, T., Watanabe, S., & Katagiri, S. (2017). Does speech enhancement work with end-to-end ASR objectives?: experimental analysis of multichannel end-to-end ASR. *International Workshop on Machine Learning for Signal Processing*, 1-5.
- [60] Davis, S. B., & Mermelstein, P. (1980). Comparison of parametric representations for monosyllabic word recognition in continuously spoken sentences. *IEEE Transaction Acoustic*, 28(4), 357-366.
- [61] Hinton, G. (2012). Deep neural networks for acoustic modeling in speech recognition: the shared views of four research groups. *IEEE Signal Processing Magazine*, 29(6), 82-97.
- [62] Huang, X., & Deng, L. (2010). An overview of modern speech recognition, *Handbook Natural*

- Language Processing, 339-367.
- [63] Huang, C., Chang, E., Zhou, J., & Lee, K. (2000). Accent modeling based on pronunciation dictionary adaptation for large vocabulary mandarin speech recognition, *Interspeech*, 818-821.
- [64] Narang, S., & Gupta, M. (2015). International journal of computer science and mobile computing speech feature extraction techniques: a review, *Journal Computer Science Mobil Computing*, 4(3), 107-114.
- [65] Winursito, A., Hidayat, R., & Bejo, A. (2018). Improvement of MFCC feature extraction accuracy using pca in Indonesian speech recognition, *International Conference on Information and Communication Technology*, 379-383.
- [66] Dave, N. (2013). Feature extraction methods LPC, PLP and MFCC, *International Journal for Advance Research in Engineering and Technology*, 1(6), 1-5.
- [67] Gupta, H., & Gupta, D. (2016). LPC and LPCC method of feature extraction in speech recognition system. *International Conference Cloud System Big Data Engineering*, 498-502.
- [68] Haridas, A. V., Marimuthu, R., & Sivakumar, V. G. (2018). A Critical Review and Analysis On Techniques Of Speech Recognition: The Road Ahead, *International Journal of Knowledge-Based and Intelligent Engineering Systems*, 39-57.
- [69] Hinton, G. (2012). Deep neural networks for acoustic modeling in speech recognition. *IEEE Signal Processing Magazine*, 29(6), 82-97.
- [70] Li, L. (2013). Hybrid deep neural network - hidden markov model (DNN-HMM) based speech emotion recognition. *International Conference on Affective Computing & Intelligent Interaction*, 312-317.
- [71] Saul, L., & Pereira, F. (1997). Aggregate and mixed-order markov models for statistical language processing. *Second Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing*, 81-89.
- [72] Karafi, M., & Cernock, J. H. (2010). Recurrent neural network based language model. *Interspeech*, 1045-1048.
- [73] Elmaghraby, A.S. (1989). Voice recognition applications for programming environments, *IEEE Energy and Information Technologies in the Southeast*, 655-659.
- [74] Chen, S. F., & Goodman, J. (1996). An empirical study of smoothing techniques for language modeling. *Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics*, 310-318.
- [75] Stolcke, A. (2000). Entropy-based pruning of backoff language models. *Proceedings DARPA Broadcast News Transcription and Understanding Workshop*, 270-274.
- [76] Bocchieri, E., & Caseiro, D. (2010). Use of geographical meta-data in asr language and acoustic models, *International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 5118-5121.
- [77] Aubert, X. L. (2012). An overview of decoding techniques for large vocabulary continuous speech recognition. *Computer Speech Language*, 16(1), 89-114.
- [78] Hoffmeister, B., Heigold, G., Rybach, D., Schluter, R., & Ney, H. (2012). WFST enabled solutions to ASR problems: beyond HMM decoding. *IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, 20(2), 551-564.
- [79] Kang, S. S. (2008). Regulation of early steps of chondrogenesis in the developing limb. *Animal Cells System*, 12(1), 1-9.
- [80] Frederick, J. Google Kitaplar, 2019. "Statistical methods for speech recognition" <https://books.google.com.tr/books>.
- [81] Gemmeke, J. F., Hurmalainen, A., Virtanen, T. & Sun, Y. (2011). Toward a practical

- implementation of exemplar-based noise robust ASR. European Association for Signal Processing, 1490-1494.
- [82] Macho, D. (2007). Narrowband to Wideband feature expansion for robust multilingual ASR. *Interspeech*, 1118-1121.
- [83] Zheng, Y. (2005). Accent detection and speech recognition for shanghai-accented mandarin. *Interspeech*, 7-10.
- [84] Das, B., Mandal, S., & Mitra, P. (2011). Bengali speech corpus for continuous automatic speech recognition system. *International Committee for the Co-ordination and Standardisation of Speech Databases and Assessment Techniques*, 51-55.
- [85] Herbig, T., Gerl, F., & Minker, W., (2012). Self-learning speaker identification for enhanced speech recognition. *Computer Speech Language*, 26(3), 210-227.
- [86] Ogawa, A., Hori, T. (2017). Error detection and accuracy estimation in automatic speech recognition using deep bidirectional recurrent neural networks. *Speech Communication*, 89(1), 70-83.
- [87] Yu, D., & Deng, L. (2015). *Automatic Speech Recognition*, Springer London, 124-129.
- [88] Hetherington, I. L. (1995). A characterization of the problem of new, out-of-vocabulary words in continuous speech recognition and understanding. *Doctoral Dissertation*, Massachusetts Institute of Technology Cambridge.
- [89] Aksoylar, C., Mutluergil, S. O., & Erdogan, H. (2009). The anatomy of a Turkish speech recognition system. *Signal Processing and Communications Applications Conference*, 512-515.
- [90] Parlak, S., & Saraçlar, M. (2012). Performance analysis and Improvement of Turkish broadcast news retrieval. *Transaction Audio, Speech Language Processing*, 20(3), 731-741.
- [91] Akin, A. A., Demir, C., & Dogan, M. U. (2012). Improving sub-word language modeling for Turkish speech recognition. *Signal Processing and communications Applications Conference*, 1-4.
- [92] Tombaloğlu, B., & Erdem, H. (2016). Development of a MFCC-SVM based Turkish speech recognition system, *Signal Processing and communications Applications Conference*, 1-4.

Speed Dependent Gain Scheduled LQI based Path Following Control System Design for Automated Vehicles

 Mümin Tolga EMİRLER 

Yıldız Technical University, Faculty of Applied Sciences, Department of Aviation Electronics, 34220, Esenler/İSTANBUL

Graphical/Tabular Abstract

Article Info:

Research article

Received: 25/06/2019

Revision 23/08/2019

Accepted: 06/10/2019

Highlights

- LQI control based path following.
- Speed dependent gain scheduling.
- Comparison of PID, LQR and LQI control systems for automated path following.

Keywords

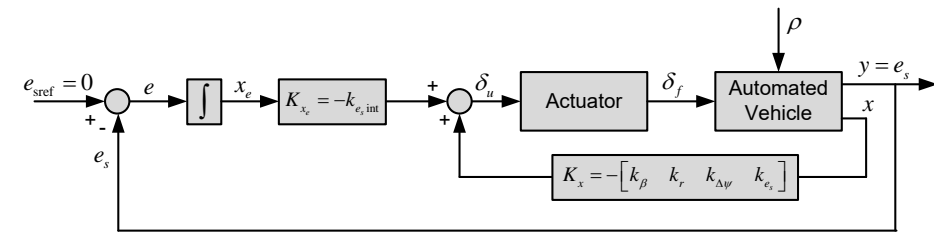
 Automated Vehicles
 Path Following
 Control System Design
 LQI
 LQR


Figure A. Automated vehicle LQI path following control system block diagram

Purpose: The main aim of this study is to design and analyze path following control systems for automated vehicles focusing on the vehicle speed changes. For this purpose, the effect of the vehicle speed on the performance of different control systems are investigated in Matlab/Simulink simulation environment.

Theory and Methods: Speed dependent LQI control optimal gain matrices are computed for each scheduled speed value by solving algebraic Riccati equation. Then, these solutions are used in the form of tables in Simulink environment. The stability of the proposed method is investigated by plotting the maximum real part of closed loop system eigenvalues with speed increments. PID, LQR and LQI controlled vehicles are compared by using a high degree-of-freedom nonlinear vehicle model which also includes a steer-by-wire actuator model.

Results: Different control systems are tested in two simulation studies. Automated vehicle tries to follow constant radius road with constant speed in the first simulation and tries to track variable radius road with variable speed in the second simulation. Statistical error values such as maximum of absolute values and root mean square error are employed to evaluate different control systems. Simulation results and statistical error values indicate that the proposed speed scheduled LQI controller shows better performance than PID and LQR controllers for constant and variable vehicle speeds in terms of following desired path and obtaining less lateral deviation error.

Conclusion: The effectiveness of the proposed LQI control system over PID and LQR control systems for automated path following problem is shown with constant speed and variable speed simulation scenarios. By using the proposed approach, smaller lateral deviation values can be obtained.



Otonom Taşıtlar için Hıza Bağlı Kazanç Uyarlamalı LQI Tabanlı Yol Takip Kontrol Sistemi Tasarımı

Mümin Tolga EMİRLER * 

Yıldız Teknik Üniversitesi, Uygulamalı Bilimler Fakültesi, Havacılık Elektronikliği Bölümü, 34220, Esenler/İSTANBUL

Öz

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 25/06/2019
Düzeltilme: 23/08/2019
Kabul: 06/10/2019

Anahtar Kelimeler

Otonom Taşıtlar
Yol Takibi
Kontrol Sistemi Tasarımı
LQI
LQR

Keywords

Automated Vehicles
Path Following
Control System Design
LQI
LQR

Otonom taşıt yol takibi, otonom taşıt kontrolündeki önemli problemlerden birisidir. Otonom taşıt istenilen hızda yol alırken istenilen yol profilini yoldan yana sapma miktarını en aza indirecek şekilde takip etmelidir. Problemin çözümü için bu çalışmada, LQI kontrol yöntemi önerilmiştir. LQI tabanlı kontrol sistemi, taşıt hızının taşıt dinamik davranışı üzerindeki etkisi dikkate alınarak hıza bağlı olarak kazanç uyarlamalı şekilde tasarlanmıştır. Önerilen yöntem yüksek serbestlik dereceli kablosuz direksiyon eyleyici modeli içeren doğrusal olmayan taşıt dinamiği modeliyle benzetim ortamında test edilmiştir. Önerilen kontrol sisteminin başarımı, PID ve LQR tabanlı kontrol sistemleriyle iki farklı bilgisayar benzetiminde karşılaştırılmıştır. Farklı kontrol yöntemlerinin sayısal olarak karşılaştırılmasında istatistiksel hata değerleri kullanılmıştır. Benzetim sonuçları ve hata değerleri göstermektedir ki hıza bağlı kazanç uyarlamalı LQI kontrol sistemi kullanan otonom taşıt, sabit ve değişken taşıt hızında istenilen yolu daha az hatayla takip etmektedir.

Speed Dependent Gain Scheduled LQI based Path Following Control System Design for Automated Vehicles

Abstract

Automated path following is one of the major problem in automated vehicle control. Automated vehicle should follow the desired path to minimize the lateral deviation from the path while traveling at the desired speed. In this paper, LQI control method is proposed to solve this problem. LQI based control system is designed based on speed dependent gain scheduling taking into account the effect of vehicle speed on vehicle dynamic behaviour. The proposed method is tested in a simulation environment with a high degree-of-freedom nonlinear vehicle model including steer-by-wire steering actuator model. The performance of the proposed control system is compared with PID and LQR based control systems in two different simulation scenarios. Statistical error values are used for numerical comparison of different control methods. Simulation results and error values show that speed dependent gain scheduled LQI control system equipped automated vehicle follows the desired path with less error at constant and variable vehicle speed.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Otonom taşıt teknolojilerine olan ilgi son yıllarda hem akademik, hem de sanayi çevrelerince yürütülen çalışmalarla hızlanarak artmaktadır. Otonom taşıt teknolojilerinin kullanımının trafik kazalarını azaltacağı, sürücü ve yolcu konforunu artıracığı, yakıt tüketimi ve emisyonları azaltarak en alt seviyeye indirgenmesine yardımcı olacağı öngörülmektedir.

Günümüzde geliştirilen otonom taşıt teknolojileri, otomotiv endüstrisi tarafından piyasada bulunan üst sınıf otomobillerde aktif güvenlik sistemleri ve ileri sürüş destek sistemleri olarak aşama aşama kullanılmaya

başlanmıştır. Bu tip sistemlere örnek olarak elektronik kararlık kontrolü, uyarlamalı seyir kontrolü, şerit uyarı ve takip sistemleri, çarpışma uyarı ve önleme sistemleri verilebilir [1].

Otonom taşıtlar, tasarımında pek çok farklı mühendislik disiplininin kullanılmasını gerektiren oldukça karmaşık yapılardır. Otonom taşıtlardaki beklenti, farklı yol koşullarında çeşitli görevleri yüksek hassasiyetle yerine getirebilmeleridir. Kontrol mühendisliği açısından otonom taşıt, üzerinde konumlandırılan algılayıcılarla çevreyi algılamalı, karar verebilmeli ve kontrol sistemleri vasıtasıyla bu kararları uygulayabilmelidir. Alınan kararlara göre otonom taşıtın kontrolü, boyuna ve yanal dinamiğin kontrol edilmesi olarak iki kısımda düşünülebilir.

Otonom taşıt yanal dinamiği kontrolünde başka deyişle yanal taşıt dinamiği otomasyonunda karşılaşılan önemli bir problem, taşıtın otonom direksiyon eyleyicisi yardımıyla önceden tanımlanan yolu takip etmesidir. Bu konuda literatürde çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Yapılan ilk çalışmalar 1990'lı yıllara gitmektedir. Ackermann ve Sienel tarafından 1990 yılında yapılan çalışmada otobüs için otomatik dayanıklı direksiyon kontrol sistemi tasarımı gerçekleştirilmiştir [2]. 1994 yılında yine Ackermann ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada, referans yolu otomatik olarak takip etmek için kayan kipli dayanıklı doğrusal olmayan kontrol yöntemi kullanılarak benzetim ortamında başarıyla test edilmiştir [3]. 2002 yılında Aksun-Güvenç ve Güvenç tarafından otomatik otobüs yol takip probleminin çözümü için ayrık zamanlı bozucu gözleyici tabanlı çözüm önerilmiştir. Çalışmada problemin çözümü için geliştirilen ayrık zamanlı bozucu gözleyicinin tasarım detayları verilmiştir [4]. Son 20 yılda mikroişlemci ve sensör teknolojilerindeki hızlı gelişme sayesinde otonom taşıtların günlük hayatta kullanım ihtimalinin artmasıyla, otonom taşıt yol takip probleminin araştırılmasına tekrar hız verilmiş ve son yıllarda bu konuyla ilgili çeşitli araştırma sonuçları yayınlanmıştır. Örneğin 2011 yılında Choi tarafından görüş mesafesindeki hedef savrulma açısı hatasını ve referans yoldan yana sapma miktarını kullanan LMI tabanlı H_∞ dayanıklı kontrol sistemi tasarlanmış ve modelleme belirsizlikleri ile sensör gürültüsüne karşı benzetimlerle test edilmiştir [5]. Rathgeber ve arkadaşlarının 2014 yılında yaptıkları çalışmada, yanal yol takibi için taşıt parametrelerindeki değişikliklere karşı dayanıklı bozucu gözleyici temelli yol takip kontrol sistemi geliştirilmiştir. Tasarımda parametre uzayı yöntemi kullanılmıştır. Önerilen kontrol yapısı şerit değiştirme manevrasıyla benzetim ve gerçek yol testi ortamında başarıyla test edilmiştir [6]. 2014 yılında Emirler ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada otonom yol takip problemi için parametre uzayı tabanlı PID kontrol sistemi tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada taşıt kütlesi, tekerlek-yol sürtünme katsayısı ve taşıt hızı belirsiz parametreler olarak ele alınarak ve doğrulanmış taşıt modeli kullanılarak benzetim ortamında test edilmiştir [7]. 2015 yılında Emirler ve arkadaşları tarafından yapılan bir diğer çalışmada ise otonom dayanıklı yol takibi için gerekli olan sensör görüş mesafesindeki yanal sapma miktarı, taşıt ağırlık merkezinin yoldan sapma miktarı ve savrulma açısı hatası kullanılarak yüksek çözünürlüklü dijital harita yardımıyla hesaplanmıştır. Bu hesap kullanılarak önerilen dayanıklı PID kontrol sistemi Ohio State Üniversitesi kampüsündeki bir yol için benzetim ortamında test edilmiştir [8]. 2016 yılında ise üstte önerilen dayanıklı PID kontrol sistemi aynı yazarlar tarafından elastik bant teorisi tabanlı yol planlama algoritmasıyla birleştirilmiştir. Böylece çarpışmanın olmayacağı yol belirlenerek otonom taşıt dayanıklı yol takip kontrolcüsüyle bu yolu takip etmektedir. Önerilen bu yöntem benzetimlerle test edilmiştir [9]. 2018 yılında bu çalışma Wang ve arkadaşları tarafından geliştirilerek başarılı bir şekilde donanım içeren benzetimlerle ve gerçek taşıt deneyleriyle test edilmiştir [10]. 2016 yılında Hu ve arkadaşları yaptığı çalışmalarda dört tekerleği bağımsız kontrol edilebilen tekerlek içi elektrik motorlu taşıtlar için yol takip kontrol sistemi tasarlamışlardır. Tasarımlarını J-dönüş ve şerit değiştirme manevrası için CarSim benzetim ortamında test etmişlerdir [11, 12]. 2018 yılında Lee ve arkadaşları tarafından otonom taşıt yol takibi problemi için PID, LQG ve H_∞ kontrol sistemleri tasarımları yapılmış ve bu tasarımlar takip başarımı, dayanıklı kararlılık ve yolcu konforu kriterleri kullanılarak karşılaştırılmıştır. Ayrıca, taşıt parametrelerindeki değişimlerin bu kriterler üzerindeki etkisini araştıran bir hassasiyet analizi gerçekleştirilmiştir [13].

Bu çalışmada literatürden farklı olarak LQI kontrol sistemi otonom taşıt yol takip problemine çözüm olarak önerilmiştir. Taşıtın dinamik davranışını önemli şekilde etkileyen taşıt hızı, kontrol sistemi tasarımda bir tasarım parametresi olarak kullanılmıştır. Böylece otonom taşıtın yol takip başarımı artırılmaya çalışılmıştır. Önerilen yöntem, PID ve LQR kontrol yöntemleriyle yüksek serbestlik dereceli doğrusal olmayan taşıt modeli ve kablo yönlendirmeli direksiyon eyleyicisi modeli içeren benzetim ortamında karşılaştırılmıştır.

Çalışmanın bundan sonraki bölümleri şu şekilde düzenlenmiştir. Bölüm 2’de doğrusal otonom taşıt yol takip modeli durum uzay formunda verilerek tanıtılmıştır. Bölüm 3’te otonom taşıt ön tekerleklerinin yönlendirilmesinde kullanılacak pozisyon kontrollü kablo yönlendirmeli direksiyon eyleyicisinin modeli verilmiştir. Bölüm 4’te benzetim çalışmalarında kullanılan çok serbestlik dereceli doğrusal olmayan taşıt modeli tanıtılmıştır. Bölüm 5’te LQR ve LQI kontrol yöntemleri anlatılarak bu kontrol sistemlerinin tasarım denklemleri verilmiştir. Bölüm 6’da otonom taşıt yol takibi için PID ve hıza bağlı kazanç uyarlamalı LQR ve LQI kontrol sistemleri anlatılmış ve hıza bağlı kazanç uyarlamalı tasarım hakkında bilgi verilmiştir. Bölüm 7’de kontrol sistemleri test etmek için yapılan iki farklı benzetim çalışmasının sonuçları verilmiştir. Çalışma Bölüm 8’de verilen sonuçlarla sonlandırılmıştır.

2. OTONOM TAŞIT YOL TAKİP MODELİ (AUTOMATED VEHICLE PATH FOLLOWING MODEL)

Bu bölümde kontrol sistemi tasarımında kullanılan doğrusal otonom taşıt yol takip modeli anlatılmıştır. Otonom taşıt yol takip modeli, yanal taşıt dinamiği kontrolünde sıklıkla kullanılan tek izli taşıt (bisiklet) modelinin referans yolun takip edilmesinde önem kazanan savrulma açısı hatasını ve yoldan yana sapma miktarını içerecek şekilde genişletilmesiyle elde edilebilir [3, 4, 7, 8].

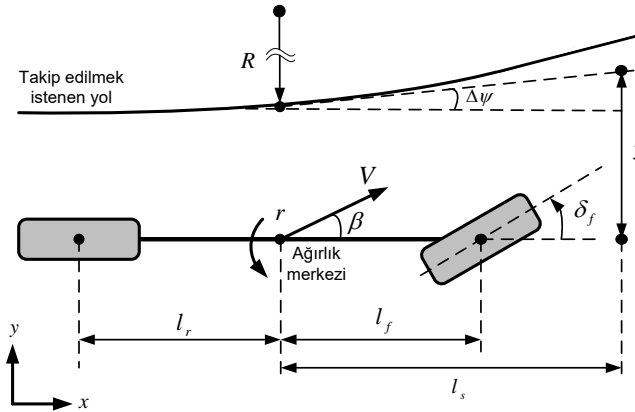
Şekil 1’de gösterilen yol takip problemi için otonom taşıt yol takip modeli durum uzay formunda alttaki gibi ifade edilebilir:

$$\dot{x} = Ax + B_1u + B_2u_d \quad 1$$

burada sistem durumları x , sistem girişi u ve bozucu girişi u_d alttaki gibi yazılabilir:

$$x = [\beta \quad r \quad \Delta\psi \quad e_s]^T, u = \delta_u, u_d = \rho \quad 2$$

burada β , r , $\Delta\psi$, e_s sırasıyla taşıt yana kayma açısını, taşıt savrulma açısal hızını, savrulma açısı hatasını ve sensör görüş mesafesinde yoldan yana sapma miktarını göstermektedir. δ_u ön tekerlek kontrol sinyalini ve ρ yol eğriliğini göstermektedir. δ_u kontrol sinyali elektrik motoru eyleyicisini yönlendirerek ön tekerleklerde δ_f ön tekerlek dönüş açısı elde edilmektedir. R yol yarıçapı olmak üzere $\rho = 1/R$ olarak tanımlanabilir.



Şekil 1. Otonom taşıt yol takip modeli [8]

Denklem (1)’deki durum uzay modeli matrisleri alttaki gibi tanımlanabilir [3, 4, 7, 8]:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ V & l_s & V & 0 \end{bmatrix}, B_1 = \begin{bmatrix} b_{11} \\ b_{21} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, B_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -V \\ 0 \end{bmatrix} \quad 3$$

burada

$$a_{11} = \frac{-(c_f+c_r)}{mV}, a_{12} = \frac{-1+(c_r l_r - c_f l_f)}{mV^2}, a_{21} = \frac{(c_r l_r - c_f l_f)}{J}, a_{22} = \frac{-(c_r l_r^2 + c_f l_f^2)}{JV}, b_{11} = \frac{c_f}{mV}, b_{21} = \frac{c_f l_f}{J} \quad 4$$

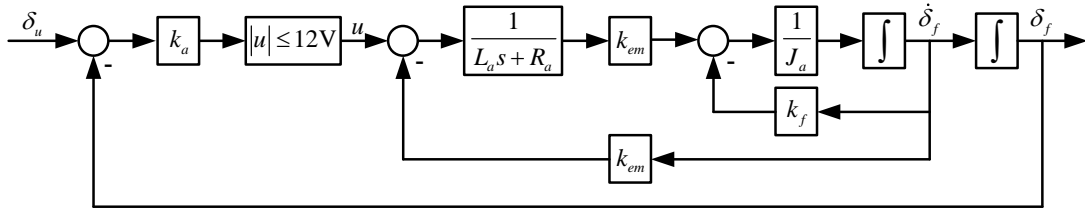
olarak ifade edilmektedir. V taşıt hızını göstermektedir. Otonom taşıt modelinde kullanılan parametreler ve sayısal değerleri Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Otonom taşıt modelinde kullanılan parametreler ve değerleri

Sembol	Açıklama	Değer
m	Taşıt kütlesi	1550 kg
J	Taşıt atalet momenti	2400 kgm ²
l_s	Taşıt ağırlık merkezine göre sensör görüş mesafesi	20 m
C_f	Ön tekerlekler için toplam dönüş katılığı	72500 N/rad
C_r	Arka tekerlekler için toplam dönüş katılığı	92500 N/rad
l_f	Taşıt ön aksıyla taşıt ağırlık merkezi arasındaki mesafe	1.07 m
l_r	Taşıt arka aksıyla taşıt ağırlık merkezi arasındaki mesafe	1.53 m

3. POZİSYON KONTROLLÜ KABLO YÖNLENDİRMELİ DİREKSİYON EYLEYİCİSİ MODELİ (POSITION CONTROLLED STEER-BY-WIRE STEERING ACTUATOR MODEL)

Otonom taşıt yol takibinde ön tekerleklerin yönlendirilmesi elektrik motoru vasıtasıyla gerçekleştirilebilir. Bu yöntem otomotiv kontrolü uygulamalarında kablo yönlendirmeli direksiyon sistemi olarak adlandırılmaktadır. Otonom yol takip kontrol sistemi tarafından belirlenen kontrol sinyali, alt pozisyon kontrollü elektrik motorunu çevirerek ön tekerleklerin dönüşü sağlanmaktadır. Pozisyon kontrollü elektrik motoru modeli blok diyagramı Şekil 2’de gösterilmiştir [14]. Burada δ_u kontrol sistemi tarafından hesaplanan ön tekerlek eyleyicisine giden kontrol sinyalini, δ_f ise elektrik motoru vasıtasıyla elde edilen ön tekerlek dönüş açısını göstermektedir. Şekil 2’de gösterilen pozisyon kontrollü elektrik motoru modeli parametreleri ve sayısal değerleri Tablo 2’de verilmiştir. Güç kaynağının 12V verdiği dikkate alınarak voltaj doyum kısıtı da modele eklenmiştir ($|u| \leq 12V$). Bu kısıt dikkate alınmazsa elektrik motoru modeli üçüncü dereceden bir sistem olarak elde edilmektedir. İndüktans değerinin çok küçük olduğu kabülü altında model ikinci dereceden bir sisteme indirgenebilir [14]. Şekil 2’de gösterilen eyleyici modeli, Matlab/Simulink ortamında oluşturularak kullanılmıştır. Bu model yapısında, voltaj kısıtının eklenmesiyle gerçekçilik artırılmıştır.



Şekil 2. Pozisyon Kontrollü Kablolü yönlendirme elektrik motoru modeli [14]

4. DOĞRUSAL OLMAYAN OTONOM TAŞIT BENZETİM MODELİ (NONLINEAR AUTOMATED VEHICLE SIMULATION MODEL)

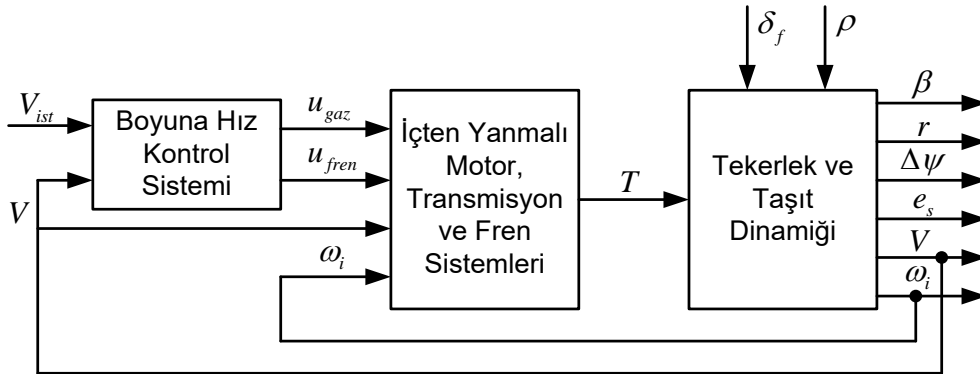
Bu bölümde benzetim çalışmalarında kullanılan doğrusal olmayan yüksek serbestlik dereceli gerçekçi otonom taşıt yol takip modeli genel olarak tanıtılmıştır. Şekil 3’te doğrusal olmayan otonom taşıt modelinin temel blokları ve sinyal akışı görülmektedir. Burada, δ_f ön tekerlek dönüş açısını, V_{ist} takip edilmesi istenen hızı, u_{gaz} gaz kontrol sinyalini, u_{fren} fren kontrol sinyalini, V taşıt hızını, ω_i i. tekerlek açısal hızını, T tekerleklere iletilen pozitif sürüş torkunu veya negatif fren torkunu ve ρ yol eğriliğini

göstermektedir. Doğrusal olmayan otonom taşıt modeli [7, 8] yayınlarındaki modellerle benzer şekilde oluşturulmuştur, ayrıca otomatik vites değişimi için tork konvertörü modeli eklenmiştir.

Tablo 2. Elektrik motoru modeli parametreleri ve değerleri [14]

Sembol	Açıklama	Değer
J_a	Motor atalet momenti	0.004053 kgm ²
k_f	Motor sönüm katsayısı	0.01625 Nms/rad
L_a	Motor armatür indüktansı (ihmal edilmiştir)	0 H
R_a	Motor armatür direnci	5 Ω
k_{me}	Motor tork sabiti = Ters-EMF sabiti (k_{em})	0.9 Nm/A
k_a	Eyleyici pozisyon kontrolü katsayısı	22.22 V/rad
\hat{u}	Voltaaj doyum değeri	12 V

Boyuna hız kontrol sistemi bloğu, gaz-fren karar algoritması ile gaz ve fren PID alt kontrolcülerini içermektedir. Bu bloktan yüzde olarak gaz kontrol sinyali u_{gaz} ve fren kontrol sinyali u_{fren} elde edilmektedir. İçten Yanmalı Motor, Transmisyon ve Fren Sistemleri bloğunda motor haritası ve denklemini içeren motor modeli, tork konvertörlü transmisyon modeli, taşıt hızına göre değişen otomatik vites algoritması ve fren torku hesaplama blokları bulunmaktadır. Bu blok ile sürüş veya fren durumlarına göre tekerleklere iletilen tork T hesaplanmaktadır.



Şekil 3. Doğrusal olmayan otonom taşıt benzetim modeli blok diyagramı

Tekerlek ve Taşıt Dinamiği bloğunda, tekerlek kuvvetleri Dug-off tekerlek modeli kullanılarak hesaplanmaktadır. Doğrusal olmayan taşıt hareket denklemleri kullanılarak model içinde geri beslenen taşıt hızı V , tekerlek açısal hızları ω_i ve taşıt durumları β , r , $\Delta\psi$ ve e_s bu blok ile hesaplanmaktadır. Direnç kuvvetleri olarak hava direnci ve yuvarlanma direnci dikkate alınmaktadır. Otonom taşıt modeliyle yapılan benzetimlerde yol takibi (yoldan yana sapma miktarı) inceleneyeceğinden taşıt düşey dinamiği (süspansiyon dinamiği), devrilme dinamiği ve yunuslama dinamiği ihmal edilmiş, bu haliyle 7 serbestlik dereceli bir model oluşturulmuştur.

5. LQR ve LQI KONTROL SİSTEMİ TASARIMI (LQR and LQI CONTROL SYSTEM DESIGN)

LQR kontrol, mühendislik uygulamalarında sıklıkla kullanılan optimal durum geri beslemeli bir kontrol yöntemidir. LQR kontrol sistemin durum değişkenlerini başlangıç koşullarından sıfıra doğru götürerek kontrolü gerçekleştirmektedir. Quadratik performans indeksindeki ağırlık matrislerinin uygun seçilmesiyle asimptotik kararlılık ve performans gereksinimleri karşılanmaktadır [15, 16]. LQR ve LQI kontrol, klasik kontrol problemlerinin yanı sıra pek çok kontrol uygulamasında da kullanılmıştır. Bu uygulamalara çeşitli örnekler verilebilir. Esmailzadeh ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada optimal savrulma momenti

kontrolü için LQR yöntemi kullanılmıştır [17]. Luong ve Tsao tarafından LQI kontrol ağır yük taşıtlarında dizel güç aktarma organlarında atık ısının geri kazanımı için organik Rankine çevriminin kontrolünde kullanılmıştır [18]. LQI kontrol yöntemi, Phillips ve Şahin tarafından iki rotorlu çok girişli-çok çıkışlı bir sistemin optimal kontrolünde kullanılmıştır [19]. Yine LQI kontrol sabit kanatlı mikro hava aracının [20] ve küçük sabit kanatlı insansız hava aracının kontrolünde kullanılmıştır [21]. Poggetto ve Serpa tarafından kazanç uyarlamalı LQR kontrol sistemi taşıt devrilme önleme kontrolünde kullanılmıştır [22]. Owczarkowski ve Horla tarafından LQR ve LQI kontrol insansız bisikletin denge kontrolünde kullanılmıştır [23]. Altun tarafından çeyrek taşıt aktif süspansiyon kontrolü için LQR ve LQI kontrolcüler tasarlanmış ve yol bozucularına göre başarımları karşılaştırılmıştır [24]. Bir başka örnek olarak LQI kontrol Kisszölgýemi ve arkadaşları tarafından küçük boyutlu turbojet motorun değişken egzoz nozuluyla kontrolünde kullanılmıştır [25]. Wang ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada ise hıza bağlı dayanıklı LQR kontrol sistemi taşıt savrulma momenti kontrolüne uygulanmıştır [26]. Bu bölümde önce LQR, daha sonra LQI kontrol yöntemlerinin denklemlerinin çıkarılışı anlatılmıştır.

Çok girişli çok çıkışlı doğrusal zamanla değişmeyen genel bir sistem, durum uzay formunda alttaki gibi yazılabilir [16]:

$$\dot{x} = Ax + Bu, y = Cx \quad 5$$

burada x , u ve y sırasıyla durum, giriş ve çıkış değişkenlerini; A , B ve C ise sırasıyla durum, kontrol ve çıkış matrislerini göstermektedir. Denklem 1 – 4 ile belirtilen doğrusal otonom taşıt durum uzay modeli matrisleri genel formda A durum matrisi aynı şekilde ifade edilmek üzere $B = B_1$ olarak yazılabilir. LQI kontrol için gerekli olan $C = [0 \ 0 \ 0 \ 1]$ olarak ifade edilebilir.

LQR optimal kontrol sisteminde amaç Denklem 6’da verilen J performans indeksinin minimize edilmesidir [16]:

$$J = \int_0^{\infty} (x^T Q x + u^T R u) dt \quad 6$$

burada Q simetrik pozitif yarı tanımlı ağırlık matrisini ve R simetrik pozitif tanımlı ağırlık matrisini göstermektedir. Denklem 6’yı minimize eden ve kapalı çevrim sistemi kararlı kılan kontrol kanunu alttaki gibi yazılabilir:

$$u = -R^{-1} B^T P x = K_{lqr} x \quad 7$$

burada K_{lqr} optimal kazanç matrisini ve P Denklem 8’de gösterilen cebirsel Riccati denkleminin çözümünden elde edilen pozitif yarı tanımlı matrisi göstermektedir.

$$PA + A^T P - PBR^{-1} B^T P + Q = 0 \quad 8$$

LQR kontrol, referans takip problemlerinde yetersiz kalmakta ve sürekli rejim hatasının giderilmesini sağlayamamaktadır. Bunun için LQR kontrolün geliştirilmiş hali olarak LQI kontrol kullanılmaktadır. LQI kontrolde sisteme integral etkisini ekleyecek yeni bir durum değişkeni tanımlanmaktadır. Bundan sonra problem LQR probleminde olduğu gibi düzenlenmekte ve cebirsel Riccati denklemi çözülerek performans indeksini minimize edecek kontrol kanunu elde edilmektedir. LQI kontrol çeşitli kontrol problemlerine başarıyla uygulanmıştır. LQI kontrolün diğer doğrusal kontrol yöntemlerine göre avantajları şu şekilde sıralanabilir [25]: (i) doğrusal kvadratik formda optimal kontrol sağlamaktadır, (ii) global olarak doğrusal zamanla değişmeyen bir sistemi kararlı kılmaktadır, (iii) integral etkiyle referans takibini sağlamaktadır, (iv) kapalı çevrim sisteme sonsuz pozitif kazanç marjini sağlayarak iyi dayanıklılık özellikleri göstermektedir. İlerleyen kısımda LQI kontrol yönteminin denklemleri çıkarılmıştır.

Referans girişi (r) ile sistem çıkışının (y) farkı olarak tanımlanan hatanın (e) integrali alttaki gibi yeni bir durum değişkeni olarak tanımlanabilir [16, 21]:

$$x_e = \int_0^{\infty} (r - y) dt = \int_0^{\infty} e dt \quad 9$$

Sürekli rejimde hatanın $e = 0$ olduğu durumda x ve u değişkenlerinin sürekli rejim değerleriyle ilgili olarak alttaki denklemler yazılabilir:

$$Ax_{\infty} + Bu_{\infty} = 0 \quad 10$$

$$Cx_{\infty} = r, (r = y) \quad 11$$

x_e 'nin sürekli rejim değeri ise tasarım serbestliği olarak seçilebilir, burada $x_{e\infty} = 0$ olarak seçilmiştir. x , u ve x_e değişkenlerinin sürekli rejim değerlerinden farkı (hatası) alttaki gibi ifade edilebilir:

$$\tilde{x} = x - x_{\infty}, \tilde{u} = u - u_{\infty}, \tilde{x}_e = x_e - x_{e\infty} \quad (12)$$

Bu değişkenler kullanılarak sistemin genişletilmiş durum uzay formu alttaki şekilde yazılabilir:

$$\begin{bmatrix} \dot{\tilde{x}} \\ \dot{\tilde{x}}_e \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} A & 0 \\ -C & 0 \end{bmatrix}}_{A_z} \tilde{z} + \underbrace{\begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix}}_{B_z} \tilde{u} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix}}_{=0} \tilde{r} \quad (13)$$

Referans giriş hatası $\tilde{r} = 0$ olduğundan Denklem 13 standart formda

$$\dot{\tilde{z}} = A_z \tilde{z} + B_z \tilde{u} \quad (14)$$

olarak yazılabilir ve alttaki J_I performans indeksi minimize edilebilir:

$$J_I = \int_0^{\infty} (\tilde{z}^T Q_z \tilde{z} + \tilde{u}^T R_z \tilde{u}) dt \quad (15)$$

Bu performans indeksini minimize edecek \tilde{u} alttaki gibi hesaplanabilir:

$$\tilde{u} = -R_z^{-1} B_z^T P_z \tilde{z} = K_x \tilde{x} + K_{x_e} \tilde{x}_e \quad (16)$$

P_z matrisi, Denklem 17'de verilen cebirsel Riccati denklemi

$$P_z A_z + A_z^T P_z - P_z B_z R_z^{-1} B_z^T P_z + Q_z = 0 \quad (17)$$

çözülerek bulunur ve P_z pozitif yarı tanımlı matrisi

$$P_z = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{12}^T & P_{22} \end{bmatrix} \quad (18)$$

elde edilerek optimal kazançlar alttaki gibi çözülebilir:

$$K_x = -R^{-1} B^T P_{11} \quad (19)$$

$$K_{x_e} = -R^{-1} B^T P_{12} \quad (20)$$

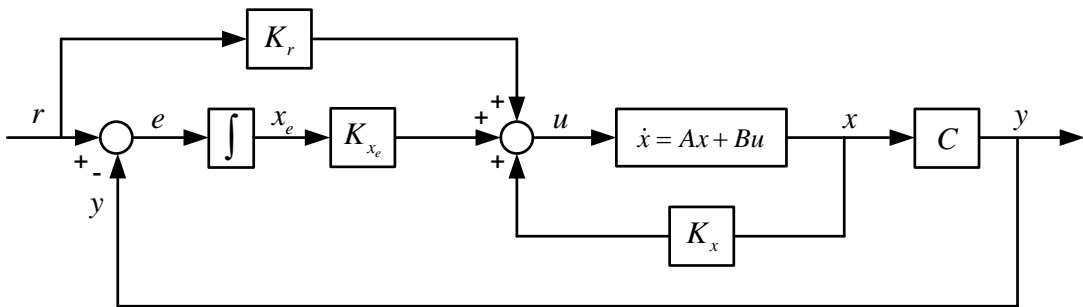
Denklem 10 – 12 ve 16 kullanılarak, verilen sistem için optimal kontrol girişi alttaki gibi yazılabilir:

$$u = K_x x + K_{x_e} x_e + K_r r \quad (21)$$

burada

$$K_r = -[C(A + BK_x)^{-1} B]^{-1} \quad (22)$$

olarak hesaplanabilir. LQI kontrolün geri besleme optimal kazanç matrisi $K_{lqi} = [K_x \ K_{x_e}]$ olarak belirtilebilir. LQI kontrollü genel bir sistemin blok diyagramı Şekil 4'te gösterilmiştir.



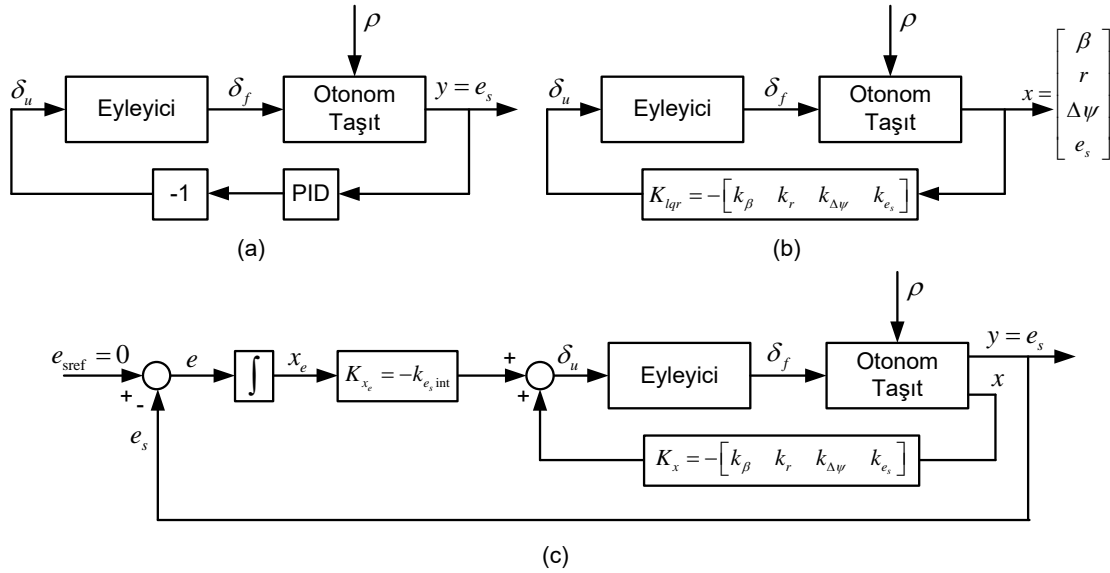
Şekil 4. LQI kontrollü genel bir sistemin blok diyagramı

6. OTONOM TAŞIT YOL TAKİBİ İÇİN HIZA BAĞLI KAZANÇ UYARLAMALI LQI KONTROL SİSTEMİ (SPEED DEPENDENT GAIN SCHEDULED LQI CONTROL SYSTEM FOR AUTOMATED VEHICLE PATH FOLLOWING)

Bu çalışmada otonom taşıt yol takip kontrolü için hızla bağlı kazanç uyarlamalı LQI kontrol sistemi önerilmiştir. Ayrıca karşılaştırma yapılabilmesi için PID ve LQR tabanlı kontrol sistemleri de aynı problemin çözümü için kullanılmıştır. LQR kontrol sistemi de, LQI gibi kazançları taşıt hızıyla değişecek şekilde tasarlanmıştır. Şekil 5'te üç kontrol sistemi için de blok diyagramları verilmiştir.

Şekil 5.a'da gösterilen PID kontrollü otonom taşıt yol takip sisteminde sadece taşıtın sensör görüş mesafesinde yoldan sapma miktarı e_s geri beslenmektedir. PID kontrol sistemi katsayıları, doğrusal otonom taşıt modeli için Matlab PID Tuner kullanılarak elde edilmiştir. PID kontrolcünün katsayıları sırasıyla (0.067; 0.045; 0.008) olarak alınmıştır. Kontrol sistemi, ρ yol eğriliğinin (bozucu etkinin) sistem üzerindeki etkisini azaltacak şekilde kontrol işaretini δ_u 'yu üretmektedir. Bu sinyalde pozisyon kontrollü kablo yönlendirmeli direksiyon eyleyicisi üzerinden δ_f otonom taşıta etki ettirilmektedir.

Şekil 5.b'de LQR kontrollü otonom taşıt yol takip kontrol sistemi görülmektedir. Denklem 1 – 4 ile belirtilen doğrusal otonom taşıt modeli kullanılarak Denklem 5 – 8'de belirtildiği şekilde cebirsel Riccati denklemi çözülerek $K_{lqr} = -[k_\beta \ k_r \ k_{\Delta\psi} \ k_{e_s}]$ optimal kazanç matrisi hesaplanmaktadır. Burada; k_β , k_r , $k_{\Delta\psi}$ ve k_{e_s} sırasıyla geri beslenen β , r , $\Delta\psi$ ve e_s taşıt durumlarına ait hesaplanan optimal kazançları göstermektedir.



Şekil 5. Otonom taşıt yol takip sistemi blok diyagramı
(a) PID kontrollü, (b) LQR kontrollü, (c) LQI kontrollü

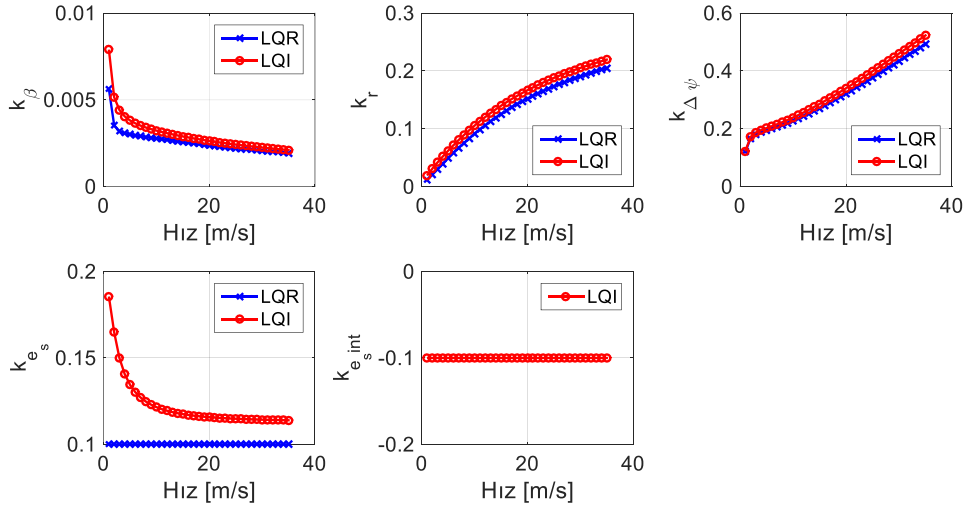
Şekil 5.c'de önerilen LQI kontrollü otonom taşıt kontrol sistemi görülmektedir. LQI kontrol sisteminde integral etkisini ekleyecek yeni bir durum değişkeni $x_e = \int_0^\infty (e_{sref} - e_s) dt$ olarak tanımlanmıştır. Burada, e_{sref} sensör giriş mesafesinde taşıtın yoldan sapma miktarının referans (istenen) değerini göstermektedir ve değeri sıfırdır. LQI kontrol sisteminin optimal kazanç matrisi $K_{lqi} = [K_x \ K_{x_e}]$ Denklem 9 – 20'da belirtildiği gibi $K_x = -[k_\beta \ k_r \ k_{\Delta\psi} \ k_{e_s}]$ ve $K_{x_e} = -k_{e_sint}$ olarak hesaplanmaktadır. Burada, k_{e_sint} yeni durum değişkeni x_e ile çarpılan optimal kazancı göstermektedir. e_s 'nin referans değeri sıfır olduğundan Denklem 22 ile hesap edilebilen K_r kazancının hesaplanmasına gerek yoktur.

LQR optimal kazanç matrisi K_{lqr} 'nin hesaplanmasında ağırlık matrisleri $Q = q_w I_{4 \times 4}$, $R = r_w$ olarak; LQI optimal kazanç matrisi K_{lqi} 'nin hesaplanmasında ise $Q = q_w I_{5 \times 5}$, $R = r_w$ olarak alınmıştır. Burada tekrarlı benzetimler sonucunda $q_w = 1$ ve $r_w = 100$ olarak seçilmiştir. $I_{n \times n}$, n boyutlu birim matrisi

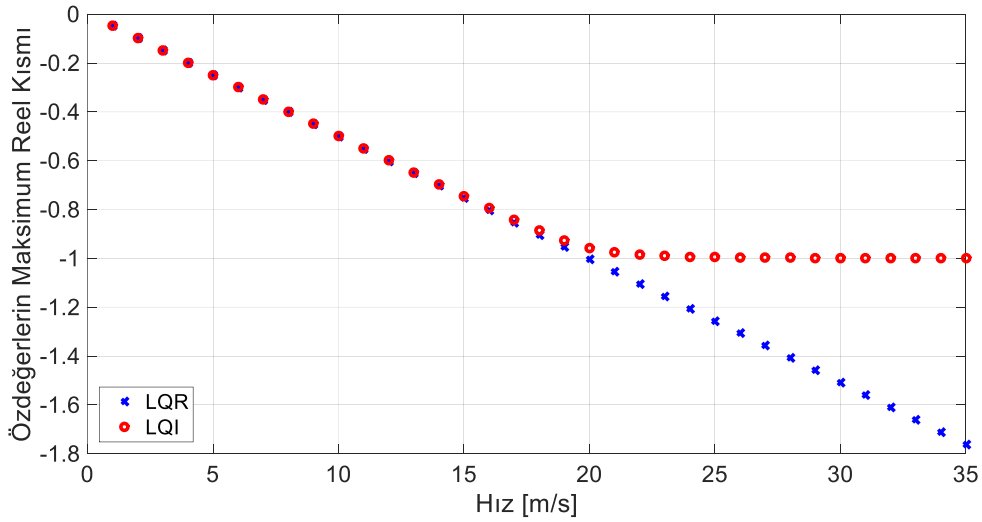
göstermektedir. LQR ve LQI karşılaştırılmasında eşit şartları sağlamak için q_w ve r_w değerleri her iki kontrol sistemi tasarımında da aynı alınmıştır.

Taşıt hızı V 'nin taşıtın dinamik davranışı üzerindeki etkisi oldukça fazladır. Bu yüzden LQR ve LQI kontrol sistemleri tasarımında taşıt hızının etkisi dikkate alınmıştır. Denklem (1) ve (3)'te verilen matrisler hıza bağlı olarak $A = A(V)$, $B_1 = B_1(V)$ ve $B_2 = B_2(V)$ şeklinde gösterilebilir. Hıza bağlı bu sistem için LQR ve LQI optimal kazanç matrisleri 1 m/s'lik aralıklarla 1 ile 35 m/s arasında $K_{lqr} = K_{lqr}(V)$ ve $K_{lqi} = K_{lqi}(V)$ olarak hesaplanmıştır. Şekil 6'da LQR ve LQI optimal kazanç katsayılarının hıza bağlı değişimi görülmektedir. Hesaplanan bu değerler ara hız değerlerinde interpolasyon yapılarak hıza bağlı tablolar olarak Simulink modelinde kullanılmıştır. Bu tarz bir yaklaşım daha önce taşıt yanal dinamiği kontrolünde [17] ve taşıt devrilme dinamiği kontrolünde [22] kullanılmıştır.

Her bir hız adımı için LQR ve LQI kontrollü kapalı çevrim sistemin kararlılığı araştırılmıştır. Kapalı çevrim sistemin kararlılığını gösteren özdeğerlerin reel kısımlarının maksimum değerleri hıza bağlı olarak Şekil 7'de gösterilmiştir. Görüldüğü gibi maksimum reel kısımlar negatif olup hem LQR, hem de LQI kontrol için kapalı çevrim sistem kararlıdır.



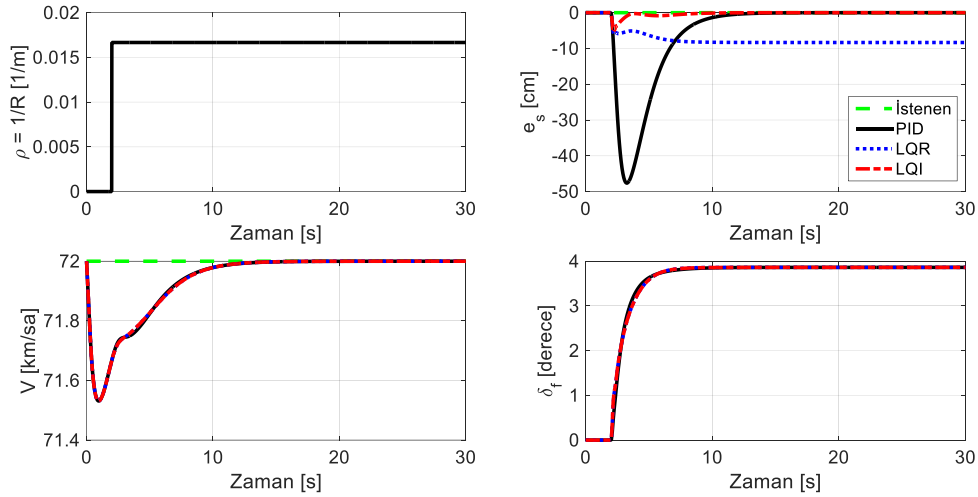
Şekil 6. LQR ve LQI için optimal kontrol katsayılarının hıza bağlı değişimi



Şekil 7. LQR ve LQI kontrollü kapalı çevrim sistem için özdeğerlerin maksimum reel kısımlarının hıza bağlı değişimi

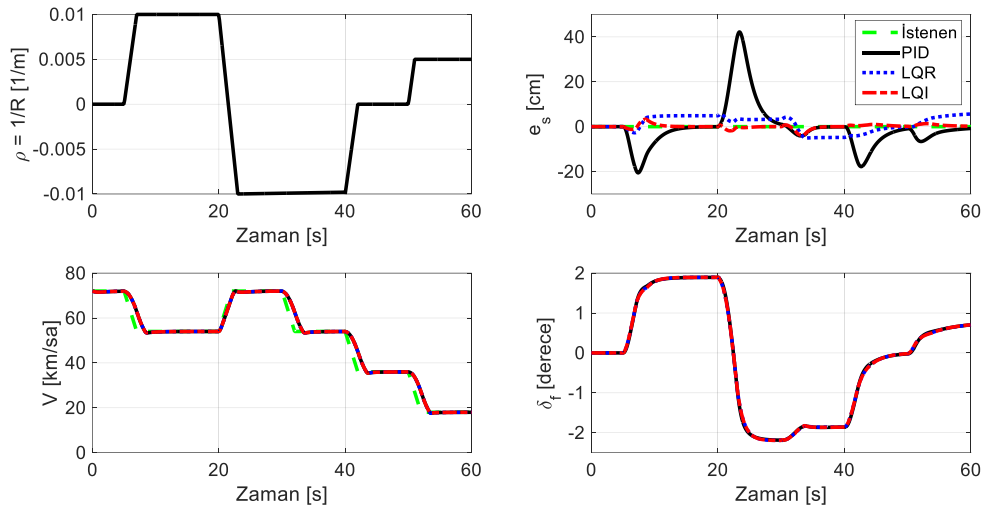
7. BENZETİM ÇALIŞMASI (SIMULATION STUDY)

Kontrol sistemleri tasarlandıktan sonra doğrusal olmayan otonom taşıt modelini içeren benzetim ortamında birbirlerine göre test edilmişlerdir. Bunun için İki farklı test senaryosu gerçekleştirilmiştir. İlk testte otonom taşıt 30 s boyunca 60 m yarıçaplı ($\rho = 1/60 = 0.01667$ 1/m) yolu 72 km/sa (= 20m/s) hızla dönmeye çalışmaktadır. Şekil 8’de benzetime ait sonuçlar görülmektedir. Şekil 8 sol alttaki grafikte görüldüğü gibi taşıt boyuna hız kontrolcüsü iyi bir şekilde çalışarak taşıt hızını (V) 72 km/sa’lik istenen değerde sabit olarak tutmaktadır. Sağ altta görüleceği üzere otonom taşıt ön tekerlek dönüş açıları (δ_f) 4 derece’nin altındadır. Sol üstteki grafikten sensör görüş mesafesinde yoldan yana sapma miktarına (e_s) bakıldığında PID kontrollü otonom taşıt istenen yoldan en fazla 47.65 cm saptığı görülmektedir. Aynı grafiğe bakıldığında PID kontroldeki integral etki sayesinde 10.s’den itibaren hata miktarı sifıra yaklaşmaktadır. Bununla birlikte LQR kontrollü otonom taşıtın yoldan yana sapma miktarı en fazla 8.34 cm’dir. Ancak LQR kontrollü otonom taşıtta integral etki olmadığından bu sapma sürekli rejim hatası olarak otonom taşıt üzerinde kalmaktadır. LQI kontrollü otonom taşıtta ise yoldan yana sapma miktarı en fazla 5.5 cm olmakta ve integral etki sayesinde çok hızlı bir şekilde sifıra yakınsamaktadır.



Şekil 8. Farklı tip kontrol sistemleri için Benzetim 1'in sonuçları

İkinci testte otonom taşıt, 60 s boyunca değişken yol eğriliğine sahip, her iki yöne dönüşler içeren bir yolu 18 km/sa ile 72 km/sa (5 m/s ile 20 m/s) arasında değişen bir hızla takip etmeye çalışmaktadır. Hız değişken alınarak hıza bağlı kazanç uyarlamalı kontrol sistemleri test edilmek istenilmiştir. Şekil 9’da bu benzetime ait sonuçlar verilmiştir. Şekil 9 sol alttaki grafikte görüldüğü gibi taşıt boyuna hız kontrolcüsü istenen hız profilini başarılı bir şekilde takip etmektedir. Sağ alttaki grafikten anlaşıldığı üzere otonom taşıt ön tekerlek dönüş açıları (δ_f) takip edilmek istenen yol ve hız profiline göre yaklaşık olarak - 2 derece ile + 2 derece arasında değişmektedir. e_s - zaman grafiğinden görüldüğü gibi PID kontrollü otonom taşıtta maksimum değeri 42.22 cm olmak üzere ani istenen yoldan sapmalar vardır ancak kontrol sisteminde bulunan integral etkiyle sürekli rejim hatası azaltılmaya çalışılmaktadır. LQR kontrollü otonom taşıtın yoldan sapma miktarı, maksimum 5.7 cm olarak PID kontrollü taşıta göre daha iyi bir başarıyı göstermektedir ancak LQR kontrol sisteminde integral etki olmadığından sürekli rejim hatası otonom taşıt üzerinde kalmaktadır. LQI kontrollü otonom taşıt ise, PID ve LQR kontrollü taşıtlara göre hem ani yana sapmalar, hem de sürekli rejim hatasının giderilmesi açısından daha başarılı sonuçlar vermektedir. İkinci benzetimde LQI kontrollü otonom taşıt için sensör görüş mesafesinde yoldan yana sapma miktarı (e_s) maksimum 3.81 cm olmaktadır.



Şekil 9. Farklı tip kontrol sistemleri için Benzetim 2'nin sonuçları

Tablo 3'te farklı tip kontrol sistemleri iki benzetim için de istatistiksel hata değerleri açısından karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmada sensor görüş mesafesinde yoldan sapma miktarının mutlak değerinin maksimumu ($\max|e_s|$) ve yine yoldan sapma miktarının ortalama karesel hatasının karekök değeri ($RMSE(e_s)$) kullanılmıştır. Bu hata değeri alttaki gibi hesaplanabilir:

$$RMSE(e_s) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (e_s - e_{sref})^2}{n}} \quad 23$$

Burada, n veri sayısıdır.

Tablo 3'e bakıldığında her iki karşılaştırma ölçütüne göre de en düşük hata değerleri LQI kontrol sistemiyle elde edilmektedir.

Tablo 3. Benzetim sonuçlarının sayısal olarak karşılaştırılması

	$\max e_s $ [cm]			$RMSE(e_s)$ [cm]		
	PID	LQR	LQI	PID	LQR	LQI
Benzetim 1	47.6479	8.3375	5.4997	8.8115	8.0278	0.4776
Benzetim 2	42.2221	5.6783	3.8056	10.1750	3.6982	0.9634

8. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada otonom taşıt yol takibi için farklı kontrol sistemleri geliştirilerek karşılaştırılmıştır. PID, LQR ve LQI tabanlı kontrol sistemlerinin geliştirilmesinde doğrusal otonom taşıt yol takip modeli kullanılmıştır. LQR ve LQI kontrol sistemleri hıza bağlı kazanç uyarlamalı olarak geliştirilmiştir. Tasarlanan kontrol sistemleri 7 serbestlik dereceli ve pozisyon kontrollü kablolu yönlendirme eyleyicisi modeli içeren otonom taşıt modeliyle benzetim ortamında test edilmiştir. Kontrol sistemlerinin karşılaştırılması için iki farklı benzetim çalışması yürütülmüştür. İlk benzetimde sabit yarıçaplı viraja sahip yol sabit hızla, ikinci benzetimde ise değişken yarıçaplı yol değişken hızla otonom taşıt tarafından takip edilmeye çalışılmıştır. Benzetim sonuçları farklı tip kontrol sistemleri için karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Kontrol sistemlerinin sayısal olarak da karşılaştırılabilmesi için sensör görüş mesafesinde yoldan yana sapma miktarının maksimum değeri ve ortalama karesel hatanın karekök (RMSE) değeri kullanılmıştır. Benzetim sonuçlarına ve sayısal karşılaştırma değerlerine bakıldığında otonom taşıt yol takibi açısından hıza bağlı kazanç uyarlamalı LQI kontrol sisteminin PID ve LQR kontrol sistemlerine göre daha başarılı olduğu görülmüştür. LQI kontrol sistemi kullanılarak LQR kontrol sistemine göre benzetim 1 ve 2'nin ortalama sonuçlarına göre

$\max|e_s|$ değeri açısından %33.51 başarımlı artışı, $RMSE(e_s)$ değeri açısından %89.72 başarımlı artışı olmuştur. Benzer şekilde LQI kontrol sisteminin başarımlı, PID kontrol sistemine göre değerlendirildiğinde ise $\max|e_s|$ değeri açısından %84 başarımlı artışı, $RMSE(e_s)$ değeri açısından %92.56 başarımlı artışı sağlanmıştır. Hıza bağımlı LQI kontrol sisteminin gerçek bir otonom taşıta uygulanmadan önce gerçek zamanlı donanım içeren benzetimlerle test edilerek geliştirilmesi önerilmektedir. Ayrıca taşıt modellenmesinde ele alınmayan parametrik belirsizlikler ile modellenmeyen kısımları dikkate alan ve dış bozucu etkileri gözetim dayanlı kontrol sistemi tasarımlarına da yönelerek önerilen kontrol sistemiyle karşılaştırılması yapılabilir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Güvenç, L., Aksun Güvenç, B., & Emirler, M. T. (2016). Connected and Autonomous Vehicles, In Internet of Things and Data Analytics Handbook, Hwaiyu Geng (Ed.), Wiley, New Jersey, 581-595.
- [2] Ackermann, J., & Sienel, W. (1990). Robust control for automatic steering, IEEE American Control Conference (ACC), San Diego, CA, USA, 795-800.
- [3] Ackermann, J., Guldner, J., & Utkin, V. I. (1994). A robust nonlinear control approach to automatic path tracking of a car, IET International Conference on Control (Control'94), Coventry, UK, 196-201.
- [4] Aksun Güvenç, B., & Güvenç, L. (2002). Robust two degree-of-freedom add-on controller design for automatic steering, IEEE Transactions on Control Systems Technology, 10(1), 137-148.
- [5] Choi, J. Y. (2011). Robust controller for an autonomous vehicle with look-ahead and look-down information, Journal of Mechanical Science and Technology, 25(10), 2467-2474.
- [6] Rathgeber, C., Winkler, F., Odenthal, D., & Müller, S. (2014). Lateral trajectory tracking control for autonomous vehicles, European Control Conference (ECC), Strasbourg, France, 1024-1029.
- [7] Emirler, M. T., Uygan, İ. M. C., Aksun Güvenç, B., & Güvenç, L. (2014). Robust PID steering control in parameter space for highly automated driving, International Journal of Vehicular Technology, 259465, 1-8.
- [8] Emirler, M. T., Wang, H., Aksun Güvenç, B., & Güvenç, L. (2015). Automated robust path following control based on calculation of lateral deviation and yaw angle error, ASME Dynamic Systems and Control Conference, Columbus, Ohio, USA, 1-8.
- [9] Emirler, M. T., Wang, H., & Aksun Güvenç, B. (2016). Socially acceptable collision avoidance system for vulnerable road users, IFAC-PapersOnLine, 49(3), 436-441.
- [10] Wang, H., Tota, A., Aksun Güvenç, B., & Güvenç, L. (2018). Real time implementation of socially acceptable collision avoidance of a low speed autonomous shuttle using the elastic band method, Mechatronics, 50, 341-355.
- [11] Hu, C., Wang, R., Yan, F., & Chen, N. (2016). Output constraint control on path following of four-wheel independently actuated autonomous ground vehicles, IEEE Transactions on Vehicular Technology, 65(6), 4033-4043.
- [12] Hu, C., Jing, H., Wang, R., Yan, F., & Chadli, M. (2016). Robust H_∞ output-feedback control for path following of autonomous ground vehicles, Mechanical Systems and Signal Processing, 70-71, 414-427.
- [13] Lee, K., Li, S. E., & Kum, D. (2018). Synthesis of robust lane keeping systems: Impact of controller and design parameters on system performance, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems (Early Access), 1-13.
- [14] Ackermann, J., Blue, P., Bünte, T., Güvenç, L., Kaesbauer, D., Kordt, M., Muhler, M., & Odenthal, D. (2002). Robust Control: The Parameter Space Approach, Springer-Verlag.

- [15] Kozáková, A., & Hypiúsová, M. (2015). LQG/LTR based reference tracking for a modular servo, *Journal of Electrical Systems and Information Technology*, 2, 347-357.
- [16] Ebihara, Y., Hagiwara, T., & Araki, M. (1999). Sequential tuning methods of LQ/LQI controllers for multivariable systems and their application to hot strip mills, *Proceedings of the 38th IEEE Conference on Decision & Control*, Phoenix, Arizona, USA, 767-772.
- [17] Esmailzadeh, E., Goodarzi, A., & Vosoughi, G. (2003). Optimal yaw moment control law for improved vehicle handling, *Mechatronics*, 13, 659-675.
- [18] Luong, D., & Tsao, T-C. (2014). Linear quadratic integral control of an organic Rankine cycle for waste heat recovery in heavy-duty diesel powertrain, *IEEE American Control Conference (ACC)*, Portland, Oregon, USA, 3147-3152.
- [19] Phillips, A., & Şahin, F. (2014). Optimal control of a twin rotor MIMO system using LQR with integral action, *World Automation Congress (WAC)*, Waikoloa, Hawaii, USA, 1-6.
- [20] Anjali, B. S., Vivek, A., & Nandagopal, J. L. (2016). Simulation and analysis of integral LQR controller for inner control loop design of a fixed wing micro aerial vehicle (MAV), *Procedia Technology*, 25, 76-83.
- [21] Smith, J., Su, J., Liu, C., Chen, W-H. (2017). Disturbance observer based control with anti-windup applied to a small fixed wing UAV for disturbance rejection, *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 88(2-4), 329-346.
- [22] Poggetto, V. F. D., Serpa, A. L. (2016). Vehicle rollover avoidance by application of gain-scheduled LQR controllers using state observers, *Vehicle System Dynamics*, 54(2), 191-209.
- [23] Owczarkowski, A., & Horla, D. (2016). Robust LQR and LQI control with actuator failure of a 2DOF unmanned bicycle robot stabilized by an inertial wheel, *International Journal of Mathematics and Computer Science*, 26(2), 325-334.
- [24] Altun, Y. (2017). Çeyrek taşıt süspansiyon sistemi için LQR ve LQI denetleyicilerinin karşılaştırılması, *Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 5(3), 61-70.
- [25] Kisszölgýemi, I., Beneda, K., & Faltin, Z. (2017). Linear quadratic integral (LQI) control for a small scale turbojet engine with variable exhaust nozzle, *IEEE International Conference on Military Technologies (ICMT)*, Brno, Czech Republic, 507-513.
- [26] Wang, Z., Montanaro, U., Fallah, S., Sorniotti, A., & Lenzo, B. (2018). A gain scheduled robust linear quadratic regulator for vehicle direct yaw moment control, *Mechatronics*, 51, 31-45.



Sintering and Properties of W-25% Re Composition for Sermet Fuel Production by Spark Plasma Method

Hüseyin ADANIR

Marmara University, Faculty of Engineering, Department of Metallurgical and Materials Engineering, 34722, Kadıköy, İstanbul

Graphical/Tabular Abstract

Article Info:

Research article

Received: 19/09/2019

Revision: 04/10/2019

Accepted: 06/10/2019

Highlights

- Spark Plasma Sintering
- Relative Density
- Micro Hardness Test

Keywords

 Tungsten-Rhenium Alloys,
 Cermet, Spark Plasma
 Sintering, Relative
 Density, Hardness.

In this study, the sintering of tungsten metal powders for cermet production by Spark Plasma Sintering (SPS) method at different temperatures and times investigated. The relative densities of the sintered tungsten samples were found to have relative densities of the theoretical density of tungsten. In order to improve the mechanical properties of cermet material, W-Re powders are -mixed using high-speed mills.

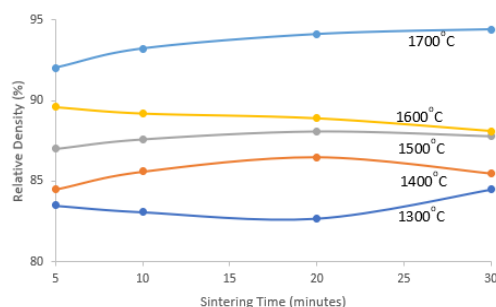


Figure A. Relative density versus to sintering time

Purpose: In the study, determination of sintering behavior of microstructure, hardness values and relative density to be obtained by sintering W-25%Re powders by SPS method at different time and temperatures and determination of sintering behavior to Tungsten can be used as cermet fuel.

Theory and Methods: The relative density and microhardness values of pure tungsten and tungsten-25 wt. % Re samples prepared via two different methods in order to investigate the physical and mechanical properties of the samples by SPS method were determined.

Results: The results have shown that the relative density of powder samples consolidated by SPS method increased up to 94% in sintering process at 1700°C for 30 minutes. Vickers hardness values of the samples were measured as 298 kg/mm². The highest relative density was found to be 97.6% at 1700°C for W-25% Re powders.

Conclusion: Spark Plasma Sintering, SPS, is a method that can be used in serial production of W and W-Re alloys for use in SERMET nuclear fuels. It was determined that the relative density of W powder samples consolidated by SPS method increased up to 94% in sintering process at 1700°C for 30 minutes. SPS application to W samples at 1300°C and 1700°C for 5 minutes; In the sample made at 1700°C, neck formation was observed between the powder particles with less porosity. Vickers hardness values of the samples were measured. An analytical formula was developed between the Vickers hardness value and the relative density of the samples, and it was calculated that the Vickers hardness value would be 378.7 kg/mm² against increasing the relative density to 100%. W-25% Re powders were sintered with SPS method at different temperatures. The highest relative density was found to be 97.6% at 1700°C. W-25% Re powders were mixed using two different low and high-speed mills. It was found that the powders prepared in the high-speed ball mill showed less displacement under the same temperature and pressure.



Spark Plazma Yöntemiyle W-%25Re bileşiminin Sermet Yakıt Üretimi İçin Sinterlenmesi ve Özelliklerinin İncelenmesi

Hüseyin ADANIR 

Marmara University, Faculty of Engineering, Department of Metallurgical and Materials Engineering, ORCID 0000-0001-5905-0094, 34722, Kadıköy, İstanbul

Öz

Bu çalışmada, sermet üretimi için %99,99 saflıkta ve 7,8 µm boyutundaki tungsten metal tozlarının Spark Plazma Sinterleme (SPS) yöntemi ile 1300°C ile 1700°C arasındaki sıcaklıklarda 5 dakika, 10 dakika, 20 dakika ve 30 dakikalık sürelerde sinterlenmiştir. Sinterlenen tungsten numunelerinin bağıl yoğunluklarının, tungsten teorik yoğunluğunun %83 ila %94'ü arasında değişen bağıl yoğunluklara sahip olduğu tespit edildi. Mikro sertlik (Vickers) deneyi ölçümlerinde, %94 bağıl yoğunluğu olan numunenin 298 kg/mm² sertlik değerinde olduğu tespit edilmiştir. Sermet malzemenin mekanik özelliklerini geliştirmek amacıyla, %99,99 saflıkta ve 13,3 µm boyutlarındaki Renyum tozları ile %99,99 saflıkta ve 0,5 µm boyutlarında Tungsten tozları, ağırlıkça %75 Tungsten-%25 Renyum tozları iki farklı yöntemle düşük ve yüksek devirli değirmenler kullanılarak karıştırıldı. Yüksek devirli bilyeli değirmende hazırlanan tozların aynı sıcaklık ve basınç altında daha az yer değiştirme (%3) gösterdiği tespit edildi. W-25% Re tozları, 1700°C ve 1900°C sıcaklıklarda ve farklı sürelerde SPS yöntemi ile sinterlendi. En yüksek bağıl yoğunluk 1700°C'de %97,6 olarak elde edildi. Buna karşılık, en az yer değiştirme (%3,3) 1900 °C'de 40 dakika süre ile sinterlenen numuneden elde edildi. Bu sonuçlar ışığında; SPS yönteminin sermet yakıt üretimi için tungsten-renyum alaşımlarının seri olarak üretilmesinde kullanılabilir bir yöntem olacağı tespit edilmiştir.

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 19/09/2019
Düzeltilme: 04/10/2019
Kabul: 06/10/2019

Anahtar Kelimeler

Tungsten-Renyum
Alaşımları, Sermetler,
Spark Plazma Sinterleme,
Bağıl Yoğunluk, Sertlik.

Keywords

Tungsten-Rhenium Alloys,
Cermet, Spark Plasma
Sintering, Relative
Density, Hardness.

Sintering and Properties of W-25% Re Composition for Sermet Fuel Production by Spark Plasma Method

Abstract

In this study, the sintering of tungsten metal powders of 99.99% purity and 7.8 µm for cermet production by Spark Plasma Sintering (SPS) method at temperatures between 1300°C and 1700°C for 5 minutes, 10 minutes, 20 minutes and 30 minutes was investigated. The relative densities of the sintered tungsten samples were found to have relative densities ranging from 83% to 94% of the theoretical density of tungsten. Micro hardness (Vickers) test, 94% relative density of the sample was found to be 298 kg / mm² hardness. In order to improve the mechanical properties of cermet material, 99.99% purity and 13.3 µm dimensions of Rhenium powders and 99.99% purity and 0.5 µm sizes of Tungsten powders, 75% by weight Tungsten-25% Rhenium powders are mixed using high-speed mills. It was found that the powders prepared in high speed ball mill showed less displacement (3%) under the same temperature and pressure. W-25% Re powders were sintered with SPS method at different temperatures and temperatures of 1700°C and 1900°C. The highest relative density at 1700°C was 97.6%. In contrast, the minimum displacement (3.3%) was obtained from the sintered sample for 40 minutes at 1900 °C. In the light of these results; It has been determined that SPS method can be used in series production of tungsten-rhenium alloys for cermet fuel production.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Uzay çalışmalarının devam edebilmesi ve gerekli araştırmaların yapılabilmesi için yüksek itiş gücüne ve uzun süreli enerjiye sahip yakıt sistemlerine ihtiyaç vardır. Bu amaçla güneş enerjisinden faydalanmak kaçınılmazdır. Füzyon reaktörlerindeki yüksek enerji yoğunluğunda olduğu gibi, uzay aracının atmosferde

herhangi bir pozisyonda güneş enerjisi yardımıyla elektrik enerjisi üretimini gerçekleştirmesi için uygun malzemeye ihtiyaç vardır. Yapılan uzay uçuşlarının hem ekonomisi hem de fiziği incelendiğinde; reaktör sistemleri başta olmak üzere toplam kütleli azaltmak aynı zamanda füzyon gücüne dayalı roket itiş sistemlerinde verimliliği artırmak için çok yüksek sıcaklıklarda çalışmayı zorunlu kılmaktadır [1,2].

Bu nedenle, uzay araştırmalarına yönelik yeni vizyon, nükleer termal enerjiye ilgiyi artırdı. Amerikan uzay araştırmaları birimi (NASA) ve Enerji bakanlığı (DOE) tarafından yapılan araştırmalar seramik-metal (sermet) yakıt malzemelerinden bu amaçla uzun vadeli teknoloji geliştirmek için çalışmalar başlatmaya odaklanmıştır. Sermet yakıtları, tungsten (W) gibi bir refrakter metal matrisinde dağılmış uranyum dioksit (UO_2) veya seramik uranyum nitür (UN) parçacıklarından oluşur. Sermet yakıtlar aynı zamanda bir dış metal kaplamaya sahiptir. Sermet yakıt formunun avantajları; ısıl şok direnci, hidrojen uyumluluğu, füzyon ürünlerinin tutulması, yüksek ısıl iletkenlik ve yüksek itiş gücüdür [3]. Hali hazırda çalışan sistemler 650 ile 2400°C arasında değişen sıcaklıklarda çalışmaktadır [4-6]. 1700°C ve üzerindeki sıcaklıklarda kullanılacak reaktörler için Tungsten bazlı, UO_2 ilaveli (%40 W- %60 UO_2) Seramik-Metal (SERMET) yakıt elemanları önerilmektedir [7,8].

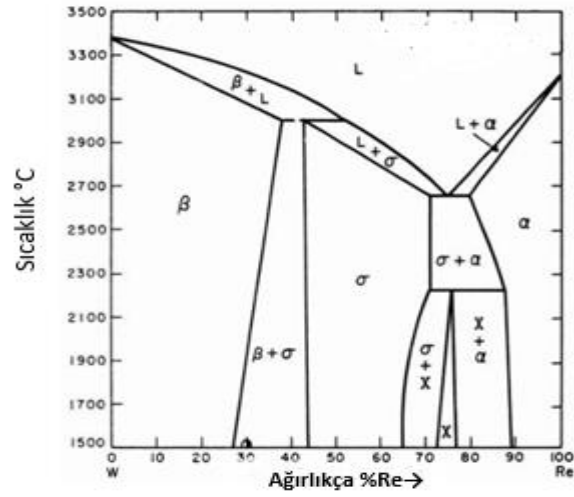
Tungsten 3412 °C' de ergime noktasına, 1700 °C üzerindeki sıcaklıklarda ise iyi bir sürünme dayanımına sahip olup, aynı zamanda hidrojene karşı korozyon direnci yüksektir [9-11]. Bu nedenle, Tungsten ve UO_2 'den uygun imalat teknikleriyle üretilecek olan SERMET malzeme 2700 °C'a kadar yüksek sıcaklıklarda kullanılabilen bir uzay nükleer yakıtı üretilebilir [7,12,13].

Bu amaçla sermet yakıtlar için yapılan çalışmalarda, GE 710 reaktör programı ve ANL nükleer roket programı gibi bir dizi program üzerinde geliştirilmiş ve test edilmiştir. Çekirdek içindeki yüksek sıcaklık, sıcak hidrojen akışı ve termal şok testi dahil olmak üzere, önemli testler yapılmıştır. Bu çalışmalar sonucunda nükleer termal uygulamaları için sermet yakıtlarının uygun olduğu sonucuna varıldı. Bu çalışmalarda yapılan testler, iki saat boyunca sıcak hidrojenle 3000 K'ya kadar olan sıcaklıklarda çalışmak için kullanılan W/ UO_2 sermet yakıt kombinasyonunun başarılı sonuçlar verdiğini göstermiştir. GE 710 programı kapsamında, W-%25Re ile kaplanmış W/ UO_2 sermet yakıtları, 50 saat boyunca 2860 K'de hidrojen ortamında ve sızdırmaz olduğu test edilmiştir. Ayrıca, W-%25Re ile kaplanmış W/ UO_2 - ThO_2 sermet malzemeler 3270 K'de 1 saat, 3170 K'de 3 saat ve 3070 K'de 10 saat test edilmiş olup, tüm test sonuçlarında hidrojen akışkanlığına karşı herhangi bir reaksiyon veya etkilenme görülmemiştir. Diğer yandan, ANL programında da yapılan çalışmalarda benzer sonuçlar elde edilmiştir. W- UO_2 sermet yakıtlarının 3000K'de 50 saat boyunca başarıyla çalışabileceği görülmüştür [14].

İlk sermet geliştirme çalışmalarının çoğu, yakıt olarak birçok özelliği bilinip tecrübe edilmiş olması nedeniyle UO_2 ile yapıldı. Ancak, oksijen göçü sorunları ve yakıt yoğunluğu sınırlamaları nedeniyle UN nin alternatif bir yakıt olarak görülmesi fikrini ortaya çıkardı. Bu nedenlerle, son yıllardaki sermet yakıt geliştirme çalışmaları, UO_2 'ye bir alternatif olarak daha çok UN'ye odaklandı. UN yakıtlarının daha yüksek spesifik uranyum içeriği gibi UO_2 'ye göre birçok avantajı bulunmakta olup, daha yüksek termal iletkenlik, daha düşük termal genleşme katsayısı (CTE) ve daha yüksek çalışma sıcaklığı özelliği sağlamaktadır. Yüksek hacimli yakıt parçacıklı sermetlerin (>%50) işlenmesindeki zorluklar nedeniyle yüksek uranyum içeriği önemli bir husustur. %72 hacimde bir UN sermet tungsten, uranyum ağırlığı açısından saf UO_2 'ye eşdeğerdir. UN nin en büyük dezavantajı, yüksek sıcaklıklarda serbest uranyum ve azota ayrışmasıdır. Bununla birlikte yapılan çalışmalar, UN'nin > 3000 K' da tungsten içinde stabil olduğunu ve azot kaçışını önlemek için tungstenin bir difüzyon bariyeri oluşturduğunu göstermiştir [15]. Sonuç olarak, termal genleşme uyumluluğu nedeniyle UN'in performansı UO_2 'den daha iyi olabilir. Bu da termal döngü nedeniyle oluşacak matris ile yakıt partikülleri arasındaki bağın zayıflamasına bağlı olarak ayrışmasını ve çatlak oluşma riskini azaltır. Uzay çalışmaları süresince sermet malzemedeki kaplama hataları meydana gelirse, yakıt UN veya UO_2 olup olmadığını kademeli olarak buharlaştırır. Bu davranış UO_2 için iyi anlaşılmıştır, ancak UN için benzer veriler oluşturmak için daha fazla çalışma gerekmektedir [3].

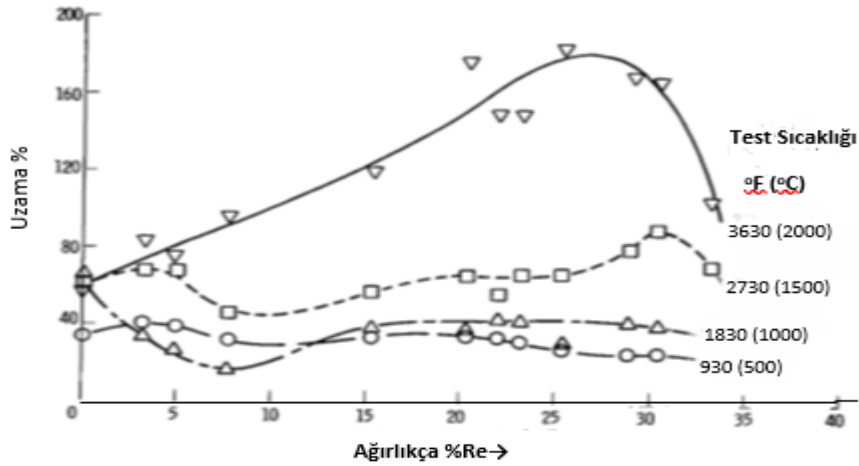
Bununla birlikte, Ta ve Mo gibi alternatif bazı matris ve kaplama malzemeleri ile yapılan araştırmalarda aday malzemeler olarak denenmiş olmalarına rağmen, Talyum daki oksijen difüzyonu ve Molibdenin düşük erime noktası nedeniyle, sonuç olarak W-bazlı malzemelerin tercih edilmesine neden oldu [16]. Ancak, W/ UO_2 kombinasyonunda 3000K'de yapılan test sırasında UO_2 yakıt parçacıkları ile tungsten matris

arasındaki bağın termal genişleme uyumsuzluğu nedeniyle zayıflaması ve ayrışması, W-Re alaşımlarını hem matris hem de kaplama için aday malzeme olarak kullanılmasını zorunlu kılmıştır. Bu nedenle, Tungsten kendisi gibi yüksek sıcaklık elementi olan Renyum ile alaşım yapılarak bu olumsuzluk giderilebilir. Re ilavesi ile saf tungstenin deformasyon kabiliyeti artmaktadır [17]. Şekil 1’de verilen Tungsten-Renyum ikili denge diyagramından görüldüğü gibi Tungsten ve Renyum her ikisi de birbiri içerisinde çözünerek katı eriyik oluşturmaktadırlar. W-%25 Re alaşımlarının üretilmesinde oluşacak kırılğan σ (W_2Re_3) ve χ (WRe_3) intermetalik fazlarının mümkün olduğu kadar minimum seviyede olmasına veya hiç oluşmamasına dikkat edilmesi gerekmektedir. İkili denge diyagramından da görüldüğü gibi Tungstene %26-27’e kadar Renyum ilavesi yapılabilir. Bu şekilde elde edilen Beta (β) katı eriyiği $3000^\circ C$ ’ye kadar kararlıdır ve yüksek sıcaklık uygulamalarında emniyetli olarak kullanılabilir.



Şekil 1. Tungsten-Renyum ikili denge diyagramı [17].

Aynı zamanda, Şekil 2’de görüldüğü gibi Renyum ilavesi ile W-Re alaşımının Sünek-Gevrek Geçiş Sıcaklığını (DBTT) azalmakta ve deformasyon kabiliyetini (% uzama) bir miktar artırmaktadır. %25 Re ilavesi ile W-Re alaşımında en yüksek sıcaklıkta ($2000^\circ C$), en yüksek % uzama değerinin elde edilmiş olduğu görülmektedir [18].



Şekil 2. W-Re alaşımlarında ağırlıkça %Re oranı artışı ile test sıcaklığının süneklik üzerindeki etkisi [18].

Seramik-metal (sermet) üretimi için farklı yöntemler vardır. Sermetler, toz malzemelerin birleştirilmesi veya yoğunlaştırılmasıyla oluşturulur. Soğuk presleme ve sinterleme, en basit ve en iyi bilinen sermet malzeme üretim yöntemidir. Presleme ve sinterleme, sıcak presleme (HP) ve sıcak izostatik presleme (HIP) gibi Toz Metalurjisi (PM) metodları ya da Spark Plazma Spreyi (SPS) gibi ileri üretim teknikleri de çok-katmanlı kompleks şekilli parçaların imalatı için araştırılmaktadır. Sermetler plaka, disk, çubuk ve tüp gibi çeşitli şekillerde üretilmektedir. Yapılan çalışmalar, sıkıştırılmış sermet tozlarının sinterlenmesi esnasındaki yoğunlaşmanın, partikül boyutuna ve sinterleme süresine bağlı olduğunu göstermiştir. Preslenme işleminden önce, toz malzemeler harmanlanarak matris içindeki yakıt parçacıklarının homojen bir şekilde dağılmasını sağlar. Homojen dağılım sermet yakıt malzemeleri için çok önemlidir, çünkü partiküllerin lokal olarak kümelenmesi farklı sıcaklık değerlerine ve boşluklara neden olacaktır. UO_2 ve UN gibi yakıt malzemelerinin reaktif özelliklerinden dolayı, harmanlama işlemi kontrollü bir ortamda gerçekleştirilmelidir. Diğer yandan, W-bazlı sermetlerin sinterlenmesi işleminde, karbon ve oksijen kirlenici maddelerin uzaklaştırılmasına yardımcı olmak için bir hidrojen atmosferinde yapılır. Ancak, yakıtın ayrışmasını önlemek için azot veya vakumda sinterleme gerekli olabilir. Yakıt partikül hesabında bileşenlerin stokiometri oranları çok önemlidir, çünkü düşük ergime noktalı fazların oluşumu veya serbest uranyum gibi zararlı etkiler ortaya çıkabilir [3].

Spark Plasma Sinterleme (SPS) tekniği de SERMET üretim metodlarından bir tanesidir. Bir sentezleme ve proses tekniği olan SPS yöntemi, sinterleme işleminin, daha düşük sıcaklıklarda ve daha kısa sürelerde, toz partiküllere elektrik enerjisinin aralıklı olarak verilmesi ve bu sıcaklıklarda anlık spark plazmaların oluşturulması ile gerçekleştirilmesini sağlayan bir üretim yöntemidir. Kendiliğinden ilerleyen yüksek sıcaklık sentezi (SHS) ve mikrodalga sinterleme yöntemlerine benzer olarak, SPS yöntemi de tozun kendiliğinden ısınması ilkesini kullanan bir hızlı sinterleme metodudur. SPS yöntemi, HP, HIP ve basıncısız sinterleme gibi konvansiyonel yöntemlere kıyasla, işlem kolaylığı, sinterleme enerjisinin kesin kontrolü, hızla tekrarlanabilme, iş güvenliği ve güvenilebilir olması gibi birçok avantaja sahiptir [19].

SPS tekniğinin kullanımı, çok kısa sürede konsolide numune üretimi için büyük gelecek vaat etmektedir. SPS, toz numunelerde kütle transferi yaygın mekanizmalarını etkinleştirmek için Joule ısıtmasını kullanır. Bir SPS makinesi bir anot, bir katot ve bir kalıptan oluşur. Kalıp, sinterleme işlemi yapılacak toz numuneleri kalıp içerisine konularak, elektrik akımı anottan kalıp içerisindeki toz karışımına geçer (bu çalışmada tungsten ve renyum), örneği bir joule ısıtma işlemi ile ısıtır. Numunenin sıcaklığı, yüksek sıcaklıktaki bir termokupl veya bir pirometre kullanılarak izlenebilir. SPS bilgisayar sistemi, akımın ve voltajı, örneğin istenen bir rampa hızında ısıtılacak ve kullanıcının belirtilen süre boyunca uygun sıcaklıkta tutulacağı şekilde düzenleyebilir. SPS yönteminin temel çalışma prensibi, grafit kalıp sistemi ve kompakt hâle gelmesi istenen tozun içerisinden yüksek akım yoğunluğuna sahip doğru elektrik akımının geçirilmesidir. Diğer sinterleme yöntemlerinin aksine, SPS tekniğinde numune içeriden ısınır. SPS yönteminde, sisteme dışarıdan bağlı herhangi bir harici ısıtıcı olmaksızın, elektrik akımını oluşturan ve bu akımı kalıp sistemine götüren bir elektrik akım jeneratörü bulunmaktadır. Böylece 600 °C/dk. gibi yüksek ısıtma ve soğutma hızlarına çıkılabildiği gibi, sinterleme işlemi dakikalar içerisinde tamamlanabilmektedir [20].

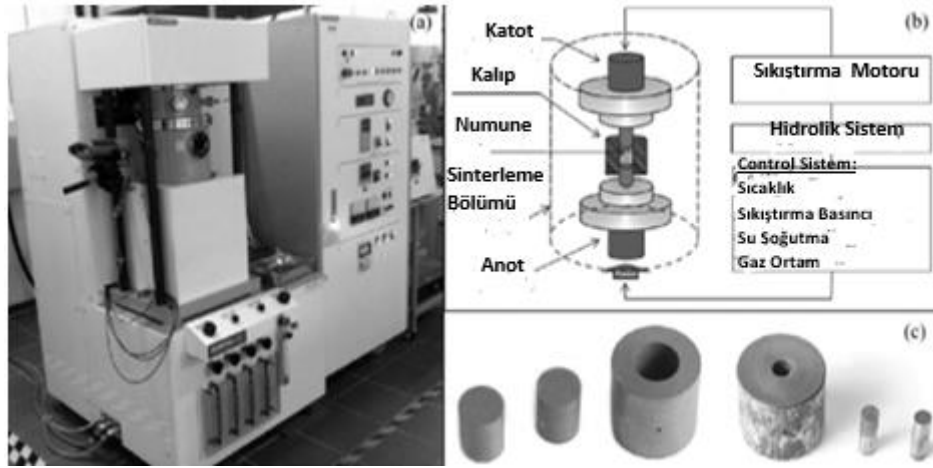
Bir SPS sistemi; dikey tek-eksenli sıkıştırma mekanizması, su soğutma sistemi ile birleştirilmiş özel dizayn edilen elektrotları, su soğutmalı vakum haznesi, vakum/hava/argon-gaz atmosferi kontrol mekanizması, doğru akım-darbeli sinterleme güç jeneratörü, soğutma suyu kontrol ünitesi, konum ölçme ünitesi, sıcaklık ölçme ünitesi, uygulanan basınç görüntü ünitesi ve çeşitli entegre güvenlik ünitelerinden meydana gelmektedir [19]. Sinterleme işlemi esnasında, sıcaklık, akım, voltaj ve basınç değerleri, zamanın fonksiyonu olarak malzemenin sinterlenmesi boyunca takip edilebilir. Sinterleme sıcaklığı, kalıba odaklanmış bir optik pirometre ile görüntülenebilir ve kontrol edilebilir [21].

SERMET yakıtları ile ilgili olarak bugüne kadar yapılan çalışmalar ve öneriler, yüksek bir ergime noktası ve sıcak hidrojen ile mükemmel uyumluluk nedeniyle tipik olarak tungsten (W) bir metal matrikse gömülü uranyum dioksit (UO_2) gibi seramik yakıt parçacıklarından oluşması ile elde edilen malzeme geliştirme çalışmalarıdır. Bu kombinasyonun olumsuz bazı özelliklerini iyileştirmek ve gelecekte bir yakıt malzemesi seçiminde ve test edilmesinde potansiyel bir seçim yapmak için daha çok araştırma yapılması gereklidir. Bu çalışmanın amacı, W-25% Re tozlarının spark plazma sinterleme yöntemiyle farklı süre ve sıcaklıklarda sinterlenmesiyle elde edilecek mikroyapının, sertlik değerlerinin ve bağlı yoğunluğun incelenerek

sinterlenme davranışının belirlenmesi ve Tungsten 'e 25% Re ilavesinin sermet bir yakıt olarak kullanılıp kullanılmayacağını irdelemesidir.

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR (EXPERIMENTAL STUDIES)

DeneySEL çalışmaların birinci kısmında, SPS yöntemiyle üretilen saf Tungsten tozlarının sinterleme sıcaklığı ve sürelerine bağlı olarak fiziksel ve mekanik özelliklerinin incelenmesi amacıyla hazırlanan tungsten numunelerinin bağıl yoğunluğu ve mikro sertlik değerleri tespit edildi. Buffalo Tungsten firmasından temin edilen ortalama 7,8 µm büyüklüğünde ve ağırlıkça %99,99 saflıkta olan tungsten tozları herhangi bir ön işlem uygulanmadan direk SPS yöntemi ile birleştirildi. Tungsten tozları 10 gram numune üretmek için hassas terazide ölçülerek silindirik 1,27 cm çapında ve 2,541 cm yüksekliğindeki grafit kalıplara konularak vakum ortamında sinterlendi. 55K/dk. ısıtma hızında belirlenen sinterleme sıcaklığına kadar ısıtıldı. Numuneler 1300°C, 1400°C, 1500°C, 1600°C ve 1700°C sıcaklıklarda 5, 10, 20 ve 30 dakikalık sinterleme sürelerinde Şekil 3'de verilen Dr. Sinter SPS-515S makinesi [21] kullanılarak sinterlendi. SPS yönteminde genellikle sinterleme esnasında hidrolik sistemle çalışan bir koçbaşı (ram) kullanılarak uygulanan bir gerilmenin etkisi altında sinterleme işlemi gerçekleştirilir. Bu deneyde, hazırlanan numunelerin tamamına 10 MPa kuvvet uygulandı. Her numune sinterleme işleminden sonra oda sıcaklığına kadar soğutulduktan sonra sinterlenmiş numuneler kalıptan çıkarıldı. Numunelerin bağıl yoğunluklarının tespitinde Arşimet yöntemi, mikro sertlik değerlerinin ölçülmesinde de 500 gr. yük uygulaması ile Vickers Sertlik ölçme yöntemi kullanılmıştır.



Şekil 3. a. SPS 515S Dr. Sinter SPS cihazının genel görüntüsü; b. Şematik görüntüsü; c. Kalıplar, Grafit (solda) ve Mo (sağda) [21].

DeneySEL çalışmaların ikinci kısmında, Buffalo Tungsten, Inc.'den satın alınan %99,99 saflıkta ve 0,5 µm boyutlarındaki tungsten tozu ile Rhenium Alloy şirketinden satın alınan %99,99 saflıkta ve 13,3 µm renyum tozu iki farklı yöntem ile karıştırıldı. Tozları karıştırma işlemine başlamadan önce, yüzey oksit kalıntılarının giderilmesi için 850°C sıcaklıkta altı saat boyunca %6H₂-%94N₂ atmosferinde redüksiyon işlemi gerçekleştirildi. Redüksiyon işleminden sonra, tozlar oda sıcaklığına kadar soğutulduktan sonra yüzeyde oluşabilecek oksitleri önlemek için argon gazı ile inert (glove-box) ortamda silindirik plastik kaplara konuldu. Birinci yöntemde, ağırlıkça %75W ve %25Re tozları beş saat boyunca 150 devir/dk. hızda karıştırıldı. İkinci yöntemde ise, ağırlıkça %75W-%25Re tozları yüksek devirli bilyeli değirmende (HEBM) 1:5 şarj oranında tungsten-karbür öğütücü bilyalar ile 125 ml'lik bir bilyeli öğütme değirmenine argon gazı atmosferi altında yüklenerek 5 saat süresince Retsch PM100 gezegen bilyeli değirmende öğütülmüştür. Burada üretilen numunenin SEM mikro yapısı Şekil 7'de verilmiştir.

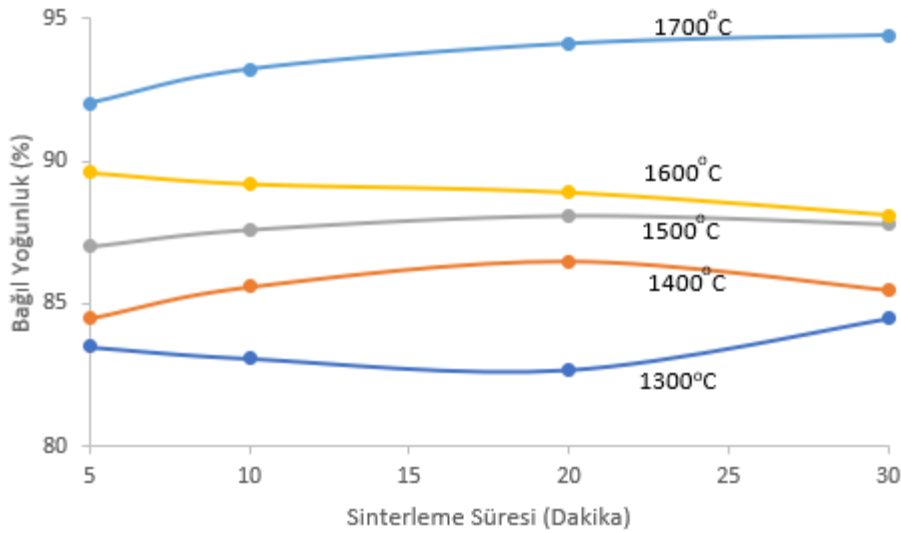
SPS sıcaklığının ve süresinin W-%25Re karışımının bağıl yoğunluğu üzerindeki etkisini belirlemek için 1700°C ve 1900°C sıcaklıklarda 10 dakika, 20 dakika, 40 dakika ve 60 dakikalık sürelerde sinterleme işlemi

gerçekleştirildi. Numunelerin bağıl yoğunlukları Arşimed metodu ile ölçüldü. SPS yöntemi ile hazırlanan konsolide numunelerde bulunan intermetalik fazları tespit ve analiz etmek için numunelerin SEM ve geri saçılan elektron (BSE) görüntülerini almak için numuneler bir elmas testereyle ikiye bölündü ve iletken bir epoksi içine sabitlendi ve son olarak Murakami (10gr. $K_3Fe(CN)_6$ +10gr. NaOH+ 100 ml. Saf su) reaktifiyle dağlandı. Hazırlanan numunelerin mikro yapısı Optik mikroskop, SEM ve BSE teknikleriyle tanımlandı. SEM görüntüleri ile geri saçılan elektron (BSE) görüntüleme, düşük yoğunluklu σ ve χ fazlardan yüksek yoğunluklu tungsten ve renyum fazlarını kontrast yapılarak farklı atom yoğunluğu alanlarını vurgulamak için kullanılmıştır.

3. BULGULAR ve TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

3.1 Bağıl Yoğunluk

Sinterleme sıcaklığı ve süresine bağlı olarak bağıl yoğunluğun nasıl değiştiği Şekil 4’de görülmektedir.



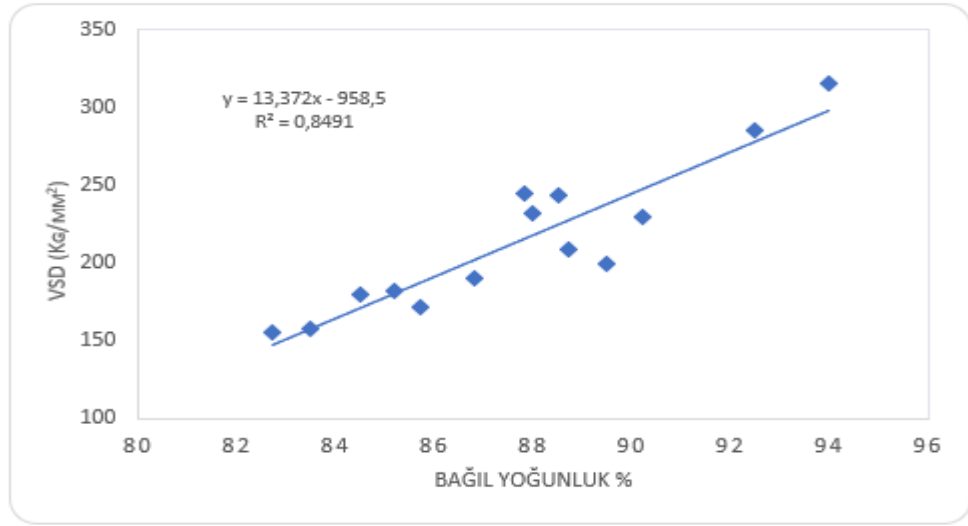
Şekil 4. 7.8 μm boyutunda W tozlardan SPS ile üretilen numunelerin bağıl yoğunlukları.

Bağıl yoğunluk, uygulanan her sinterleme sıcaklığı için sinterleme süresinin bir fonksiyonu olarak gösterilmiştir. Her bir sıcaklık değeri için sadece dört farklı sinterleme süresinin belirlenmiş olması; bağıl yoğunluktaki değişimin net olarak belirlenmesini biraz zorlaştırmaktadır. Bununla birlikte, sinterleme sıcaklığının numunelerdeki bağıl yoğunluğun değişimi üzerindeki etkileri açıkça görülmektedir. Bağıl yoğunluktaki farklı dışbükey ve içbükey eğilimler, tungsten toz numunelerin içerisine konulduğu grafit kalıplar nedeniyle zaman ve sıcaklığa bağlı olarak değişen karbon difüzyonuna bağlı olabilir.

SPS yöntemiyle sinterlenmiş tungsten numunelerin 1300°C, 1400°C, 1500°C, 1600°C ve 1700°C sinterleme sıcaklıklarında hazırlanan numunelerin bağıl yoğunluk değerlerinin %83 ile %94 arasında değiştiği tespit edilmiştir. Bağıl yoğunlukların hesaplanmasında tungstenin teorik yoğunluğunun $19,25 \text{ g/cm}^3$ olduğu varsayılmıştır.

3.2 Vikers Mikro-Sertlik

Sinterlenen numunelerin bağıl yoğunluklarına bağlı olarak mikro sertlik değerlerinin değişimi Şekil 5’de görülmektedir.



Şekil 5. 7,8 μm tungsten tozlardan SPS ile üretilen numunelerin bağıl yoğunluklarına bağlı olarak mikro sertlik (VSD) değerleri.

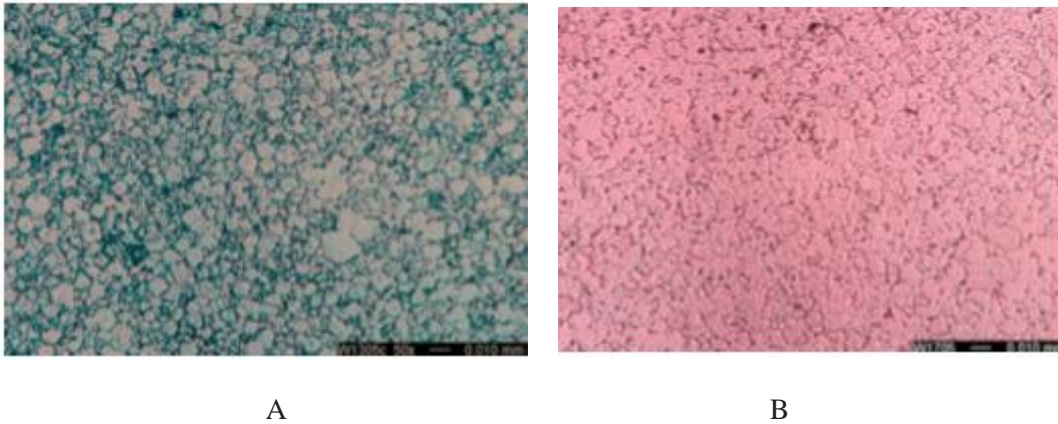
Her numunenin mikro sertliği, üç ayrı sertlik değerinin ortalaması olarak Vickers Sertlik Değeri (VSD) yöntemi ile ölçülerek belirlenmiştir. Vickers sertlik değeri, denklem 1'de gösterilen analitik ifadeye lineer bir regresyon tekniği kullanılarak elde edilmiştir.

$$\text{VSD} = 13,372 \times \text{Bağıl Yoğunluk} - 958,5 \quad (\text{Denklem: 1})$$

Sinterlenmiş numuneler tam olarak %100 bağıl yoğunluğa kadar sinterlenmemiş olsada, lineer regresyon eğrisi ile ekstrapolasyon yapılarak %100 bağıl yoğunluktaki sinterlenmiş numunelerin Vickers sertlik değerinin 378,7 kg / mm² olacağı tahmin edilmektedir. Bu nedenle, SPS uygulamasında yapılacak farklı optimizasyonlar ile daha yüksek bağıl yoğunluklu sinterlenmiş tungsten numuneleri elde etme ihtimali yüksektir.

3.3 Mikroyapı

Yüksek ve düşük sıcaklıklarda yapılan sinterleme sonrasındaki numunelere ait optik mikroskop görüntüleri Şekil 6'da görülmektedir. Her numunenin optik mikroyapı görüntüleri, 1300°C ve 1700°C sıcaklıklarda yapılan sinterlemenin tane boyutu ve porozite üzerindeki etkisi görülmektedir. 1700 °C de yapılan sinterleme ile daha ince taneli ve daha az poroziteye sahip olduğu görülmektedir.

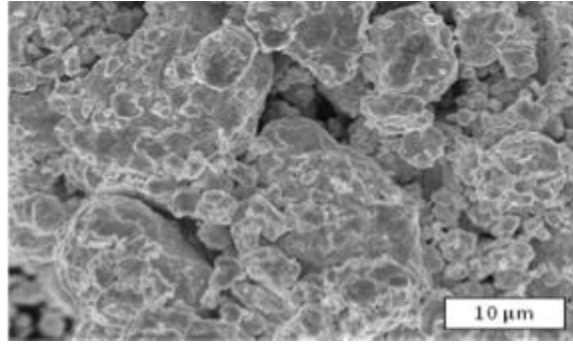


Şekil 6. 7,8 μm tungsten tozlarının 1300°C (A) ve 1700°C (B) sıcaklıklarda 5 dk. Sinterleme yapılmış numuneye ait optik mikroyapıları.

Şekil 6. A'da verilen resimde, 5 dakika boyunca 1300°C'de sinterlenmiş numunede mevcut olan büyük miktarda porozitenin olduğu görülmektedir. Şekil 6.B verilen resimde, 1700°C'de 5 dakika sinterlenen numunenin mikroyapısı görülmektedir. Bu resim, 5 dakika boyunca uygulanan sinterlemenin son aşamasını gösterirken, tungsten tozları arasındaki boyun oluşumunun başlangıç aşamasında göstermektedir.

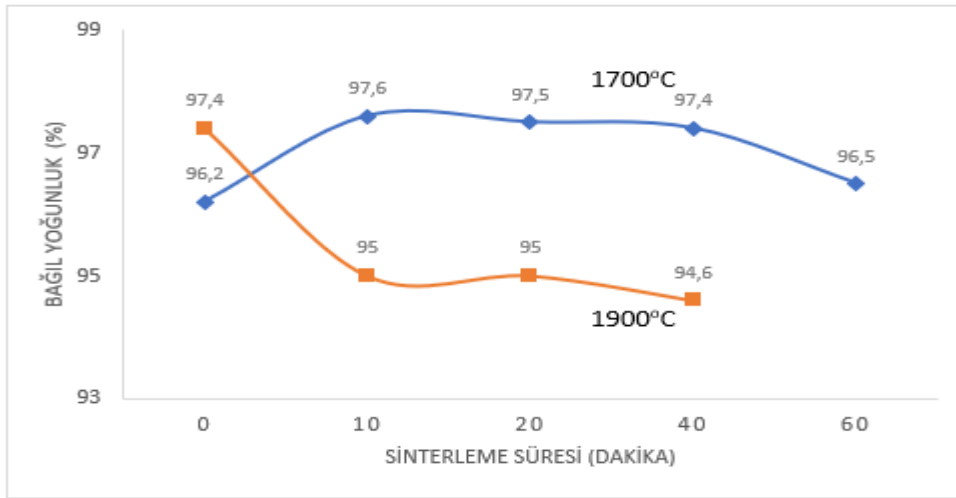
Eşdeğer tane yapısını elde etmek için daha uzun sürede ve daha yüksek sıcaklıklarda sinterleme işleminin yapılması gerektiğini göstermektedir.

Mekanik olarak alaşımli bir W-25at% Re elde etmek için, yüksek devirli bilyeli değirmende (HEBM) karıştırılan Tungsten ve Renyum tozlarının SEM görüntüsü, Şekil 7'de verilmiştir. Sinterleme öncesinde topaklaşmış oldukları görülmektedir.



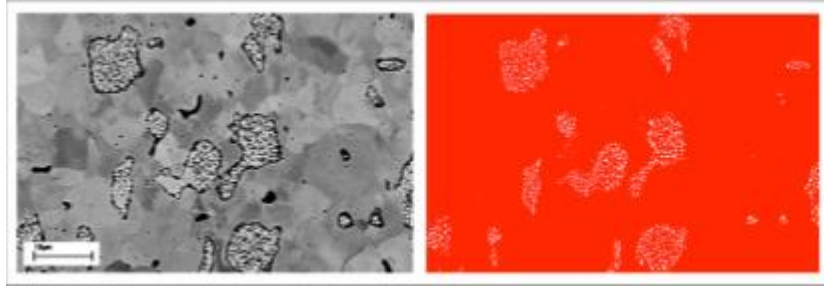
Şekil 7. Yüksek devirli değirmende öğütülen W-%25Re karışımının SEM görüntüsü.

1700°C ve 1900°C'de 10 dakika, 20 dakika, 40 dakika ve 60 dakika sürelerde sinterlenen W-25at% Re numunelerine ait bağıl yoğunluk sinterleme sıcaklığı ve zaman grafikleri Şekil 8'de verilmiştir. 1900°C'de sinterlenmiş numunelerin yoğunluğunun, 0 dakika dışındaki tüm bekletme sürelerinde 1700°C'de sinterlenen numunelere göre daha düşük bağıl yoğunluk değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Yüksek sıcaklıklarda bağıl yoğunluğun azalması, karbonun grafit kalıptan içeri doğru sinterlenen W-%25Re tozlarına difüzyonundan kaynaklanması ihtimali ile açıklanabilir. Bu sorunlar genellikle küçük hacimli numunelerle çalışılırken karşılaşılan sorunlardır. Aynı zamanda, bağıl yoğunluklar numunelere artan karbon difüzyonuna bağlı olarak karbonun yapıda oksitlenmesi sonucu porozite oluşumu, muhtemel sinterleme bekletme süresinin bir fonksiyonu olarak da düşmektedir.



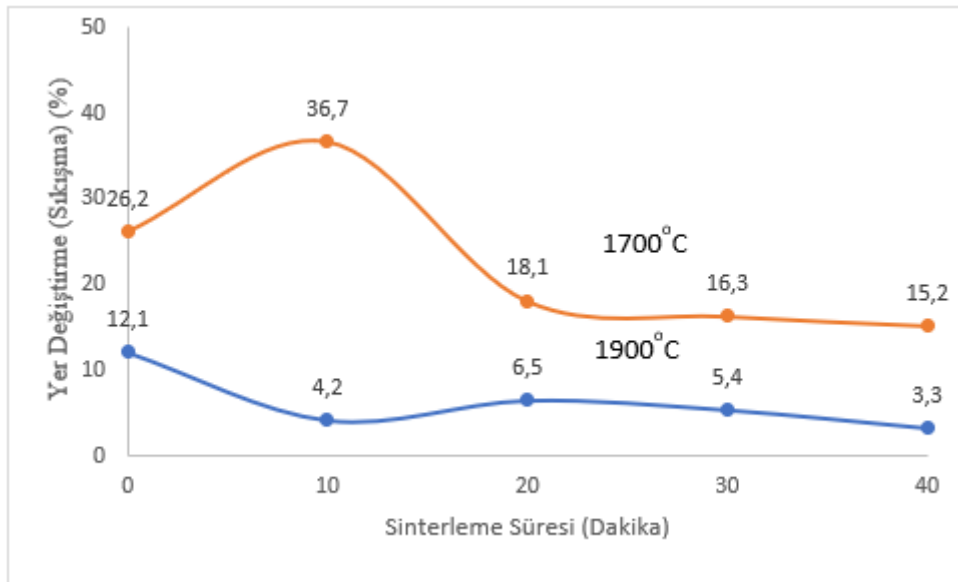
Şekil 8. Homojen olarak karıştırılarak SPS yöntemi ile üretilen W-%25Re Tozların Bağıl Yoğunluğu.

SEM incelemesi yapılan numunelerin, atom yoğunluklarındaki farklılıkları göstermek için, karakterizasyon amacıyla iki parçaya kesilen (bölünen) W-%25 Re numunesinin diğer (zıt) kısmının mikro yapısından alınmış bir Back Scattering Electron (BSE) görüntüsü Şekil 9'da görülmektedir. Düşük yoğunluklu σ fazı içeren yüzey alanının oransal olarak yüzdesini belirlemek için bir bilgisayar programı (Image J) kullanılmıştır.



Şekil 9. 1700°C sıcaklıkta 20 dakika sürede sinterlenen W-%15Re numunesine ait BSE W-25at% 'inin görüntüsü kontrasttan önce (solda) ve kontrasttan sonra (sağda).

Harmanlanmış W-%25Re tozları, 1700°C ve 1900°C sıcaklıklarda 0 dakika ve 40 dakika bekleme sürelerinde sinterlendi. Şekil 10'da verilen grafikte, sinterleme sıcaklığındaki, 200°C artışın gerçekten karışım içindeki inter-metaliklerin çözünme hızlarını artırmaya yönelik ve buna bağlı olarak yer değiştirmeye (sıkışmaya) ne kadar yardımcı olduğunu göstermektedir. 10 dakikalık sürede yapılan sinterleme işleminde; 1700°C'de %36,7 oranında bir yer değiştirme izlenirken 1900 °C da yapılan sinterleme işleminde %4,2 lik bir yer değiştirme görülmektedir.

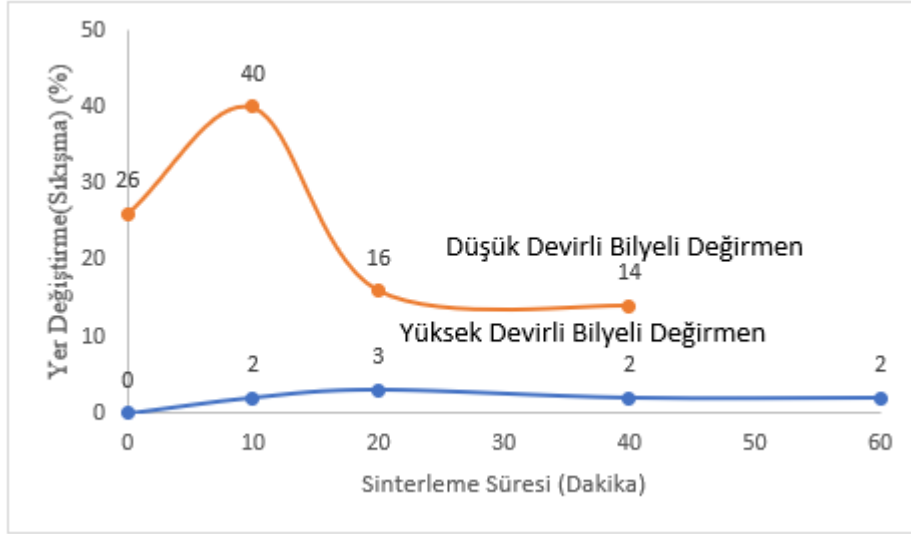


Şekil 10. W-%25Re tozlarının 1700 ve 1900 °C sıcaklıklarda yapılan SPS prosesinde sinterleme süresine bağlı olarak yer değiştirmeleri.

Burada, 1700°C de yapılan SPS uygulamasının eşit sinterleme süresinde daha yüksek oranda yer değiştirmeyi gerçekleştirdiği görülmektedir.

Diğer yandan, yüksek devirli bilyeli değirmende (HEBM) hazırlanan toz numuneler, konvansiyonel bilyeli değirmende hazırlanan numuneler ile karşılaştırmak için 1700°C sıcaklıkta ve farklı sinterleme (10, 20, 40 ve 60 dakika) sürelerinde sinterleme işlemi yapıldı. Yüksek devirli bilyeli değirmende hazırlanan tozlardan üretilen sinterlenmiş numuneler, büyük ihtimalle tozların mekanik alaşımlanmış olmaları nedeniyle, Şekil 11'de gösterildiği gibi, çok az oranda bir yer değiştirme görülmektedir. Yüksek devirli bilyeli değirmende

karıştırılarak hazırlanan numunelerde en fazla %3'lük bir yer değiştirme görülmesine karşılık, konvansiyonel bilyeli değirmende hazırlanan numunelerin yaklaşık %40'lık bir yer değiştirmesi görülmektedir. Aynı sıcaklıkta, 20 dakika süreli sinterleme süresinde konvansiyonel bilyeli değirmende hazırlanan numuneler %16 oranında yer değiştirirken, yüksek devirli bilyeli değirmende hazırlanan numunelerin %3 oranında yer değiştirdiği görülmektedir.



Şekil 11. İki farklı değirmende hazırlanan W-%25Re tozlarının SPS prosesinde sinterleme süresine bağlı olarak yüzde olarak sıkışma oranları.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

- Spark Plazma Sinterleme, SPS, yöntemi SERMET nükleer yakıtlarında kullanılmak üzere tungsten ve tungsten-renyum alaşımlarının seri olarak üretilmesinde gelecekte kullanılacak bir yöntem olduğu tespit edilmiştir. SPS yöntemi ile konsolide edilen tungsten toz numunelerinin bağıl yoğunluklarının 1700°C de 30 dakika sinterleme işleminde %94'e kadar arttığı tespit edilmiştir. Tungsten numunelerine, 1300°C ve 1700°C sıcaklıklarda 5 dakika süreyle yapılan SPS uygulamasında; 1700°C de yapılan numunede daha az porozite ile toz parçacıkları arasında boyun oluşumu görülmüştür.
- Numunelerin Vickers sertlik değerleri ölçülmüş, bağıl yoğunluğu en yüksek olan numunenin Vickers sertlik değeri 298 kg/mm² olarak tespit edilmiştir. Vickers sertlik değeri ile numunelerin bağıl yoğunluğu arasında analitik bir formül geliştirilerek bağıl yoğunluğun %100 değerine artmasına karşı Vickers sertlik değerinin 378,7 kg/mm² olacağı hesap edildi.
- W-25% Re tozları, 1700°C ve 1900°C sıcaklıklarda ve farklı sürelerde SPS yöntemi ile sinterlendi. En yüksek bağıl yoğunluk 1700°C'de %97,6 olarak tespit edildi. W-25% Re tozları iki farklı düşük ve yüksek devirli değirmenler kullanılarak karıştırıldı. Yüksek devirli bilyeli değirmende hazırlanan tozların aynı sıcaklık ve basınç altında daha az yer değiştirme gösterdiği tespit edildi. Bu sonuç, gelecekte yapılacak çalışmalarda 1 µm veya mikron altı tozlardan üretilecek tungsten-renyum numunelerinin bağıl yoğunluklarını, ortalama tane büyüklüklerini ve sertlik değerlerinin kontrol edilmesinde bu yöntem önem taşıyacaktır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Angelo, J. A., and Buden, D., (1985) Space Nuclear Power, Orbit Book Co., Malibar, FL., ISBN-13: 978-0894640001.
- [2] Hill, P., Peterson, C., (1992) Performance of Rocket Vehicles in Mechanics and Thermodynamics of Propulsion, Addison Wesley Publishing Co., Reading, MA., pp. 469-494.

- [3] Hickman R., Panda B., Shah S., Fabrication of High Temperature Cermet Materials for Nuclear Thermal Propulsion, 53rd JANNAF Propulsion Meeting/Id Spacecraft Propulsion Subcommittee Meeting, Monterey CA, (December 2005)
- [4] Mason L., et. al., Fission Surface Power System Initial Concept Definition, National Aeronautics and Space Administration, NASA/TM-2010-216772, pp. 18, (2010). <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=20110007114> 2019-07-12T00:55:59+00:00Z
- [5] Lyon, L. L., Performance of (U, Zr) C-Graphite (Composite) and of (U,Zr) C (Carbide) Fuel Elements in the Nuclear Furnace 1 Test Reactor, Los Alamos National Laboratory, LA-5398-MS, (1973). DOI: 10.2172/4419566
- [6] Angelo, J. A., and Buden, D., "Uranium-Zirconium-Hydride Reactor Power Plants", in Space Nuclear Power, Orbit Book Co., Malabar, FL., (159-175), (1985).
- [7] Bhattacharyya, S. K., An Assessment of Fuels for Nuclear Thermal Propulsion, Argonne National Laboratory, ANL/TD/TM01-22, (50-68), (2001).
- [8] Burkes, D. E., Wachs, D. M., Werner, J. E., Howe, S. D., An Overview of Current and Past W-UO₂ CERMET Fuel Fabrication Technology, Idaho National Laboratory, INL/CON-07-12232, (2007).
- [9] Sawyer, J. C., and Philleo C. H., Generation of Long Time Creep Data of Refractory Alloys at Elevated Temperatures, National Aeronautics and Space Administration, NASA CR-54228, pp. 8 (1964).
- [10] Zee. R. H., and Rose, F. M., High Temperature Materials Technology Research for Advanced Thermionic Systems, U.S. Department of Energy, DOE/SF/19645-T12, pp. 17-32, (1998).
- [11] Lundberg, L. B., and Hobbins, R. R., Nuclear Fuels for Very High Temperature Applications, Idaho National Engineering Laboratory, EGG-M-92067, pp. 2, (1992).
- [12] Marlowe, M.O., and Kaznoff, A. I., Development of a Low Thermal Expansion Tungsten-UO₂ CERMET Fuel, National Aeronautics and Space Administration, NASA CR-72711, (1970).
- [13] Baker, R. J., et.al., Basic Behavior and Properties of W-UO₂ CERMETS, National Aeronautics and Space Administration, NASA-CR-54840, 1965 Klopp, W. D., Review of Group VIA Elements by Rhenium And Other Solutes, National Aeronautics and Space Administration, NASA TN D-4955, pp. 3-12, (1968).
- [14] Homan F. J., Napier, J. M., Caldwell, C. S., "Particle Fuels Technology for Nuclear Thermal Propulsion" AIAA/NASA/OAI Conference on Advanced SEI Technologies, Cleveland, OH, A M 91-3457, (Sept. 1991).
- [15] Takkunen, P. D., Fabrication of Cermets of Uranium Nitride and Tungsten or Molybdenum from Mixed Powders and from Coated Particles, NASA Report TN D-5 136, (April-1969).
- [16] Anghaie, Samim, Harris, P. "Evaluation of Cermet Fuels Test Data", Proceedings of the International Conference on Advances in Nuclear Power Plants (ICAPP), Pittsburgh, PA, pp 2240-2248, (June 13 -17, 2004).
- [17] ASM Speciality Handbook (2004): Heat-Resistant Materials, ASM International The Materials Information Society, Ohio.
- [18] Garfinkle, M., Witzke, W. R., and Klopp, W. D., Superplasticity in Tungsten-Renium Alloys, Lewis Research Center-NASA, Cleveland, OH, (1968).

- [19] Tokita, M. Mechanism of spark plasma sintering, Sumitomo Coal Mining Company, Ltd., Kanagawa 213, Japan.
- [20] Orrù, R., Licheri, R., Locci, A.M., Cincotti, A., Cao, G. Consolidation/synthesis of materials by electric current activated/assisted sintering, *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 63(4-6), (127-287), (2009).
- [21] Papynov, E.K., Shichalin, O.O., Mirenenko, A. Y., Ryako, A. V., Manakov, I. V., Makhrov, P.V., Brawlev I. Yu., Tananaev, I. G., Avramenko, V.A., Sergivenko, V. I., Synthesis of High-Density Pellets of Uranium Dioxide by Spark Plasma Sintering in Dies of Different Types, *Radiochemistry*, 60-4 (362-370), (2018).

Global Solar Irradiance Time Series Prediction Using Long Short-Term Memory Network

Ahmet KARA 

Hitit University, Faculty of Engineering, Department of Industrial Engineering, 19030, Merkez/ÇORUM

Graphical/Tabular Abstract

In this study, it is proposed a deep neural network approach, which has the capability to extract superior features on complex and nonlinear time series data, for forecasting global solar irradiance more accurately. This approach has also been used to expose both the relationship between input data and output data, as well as the contribution of input data to the output data.

Article Info:

Research article

Received: 30/05/2019

Revision 10/10/2019

Accepted: 20/10/2019

Highlights

- LSTM model for the global solar irradiance prediction.
- Comparison with state-of-the-art approaches.
- Considering the performance criteria consisting of MAE, RMSE, MAPE, and r2.

Keywords

Deep neural network
 Time series forecasting
 Long short-term memory
 Solar irradiance
 Machine learning

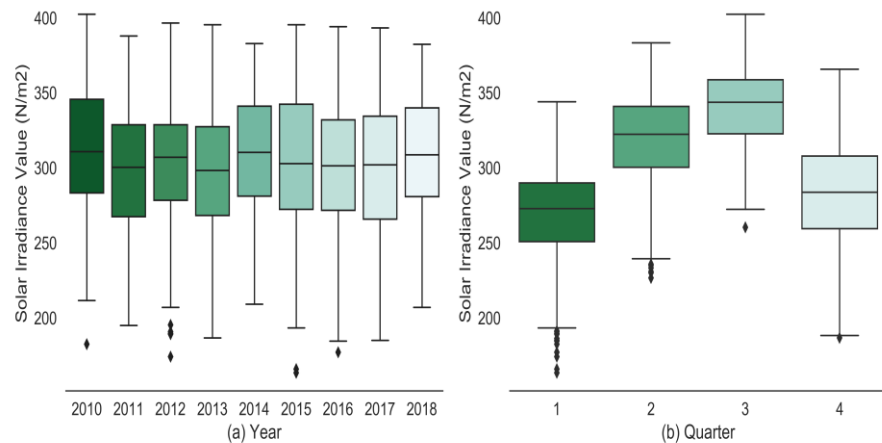


Figure A. The box plot of solar irradiance (a) Year (b) Quarter.

Purpose: In this study, it is aimed to develop an accurate and effective prediction model using the LSTM neural network due to a rapidly growing interest in solar power generation. It is aimed to reveal that the proposed model based on a deep learning approach outperforms compared to machine learning models and statistical models.

Theory and Methods: To overcome the complexity and nonlinearity issues in time series forecasting, the LSTM neural network that is a variation of the recurrent neural network is used to predict daily global solar irradiance. The effectiveness of the suggested method is compared with the state of the art machine learning algorithms such as Decision Tree Regression, Random Forest Regression, Gradient Boosting, and K-Nearest Neighbor.

Results: To evaluate the performance of the proposed model for daily global solar irradiance, it is compared by four metrics comprising MAE, RMSE, MAPE, and r2. The results have shown that the proposed LSTM model is more effective and superior according to the other benchmark models.

Conclusion: In this study, it has been suggested a deep LSTM model based on deep learning for forecasting daily global solar irradiance more accurately. The presented LSTM model can extract quality features that represent sophisticated and nonlinear characteristics of time series data. Also, it has been indicated that the proposed model is a robust and useful model compared with state-of-the-art machine learning models.



Uzun-Kısa Süreli Bellek Ağı Kullanarak Global Güneş Işınımı Zaman Serileri Tahmini

Ahmet KARA 

Hitit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, ORCID:0000-0002-1590-0023, 19030, Merkez/ÇORUM

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 30/05/2019
Düzeltilme: 10/10/2019
Kabul: 20/10/2019

Anahtar Kelimeler

Derin sinir ağı
Zaman serileri tahmini
Uzun kısa süreli hafıza
Güneş ışınımı
Makine öğrenmesi

Keywords

Deep neural network
Time series forecasting
Long short-term memory
Solar irradiance
Machine learning

Öz

Global güneş ışınımı tahmini, güneş enerjisi sistemlerinin etkin yönetimi ve işletilmesinin yanı sıra gelecekteki enerji üretimi hakkında güvenilir bilgi sağlamak için giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Bu çalışmada, günlük güneş ışınım tahmin problemini etkin bir model oluşturmak için Uzun Kısa Süreli Bellek (Long Short-Term Memory - LSTM) ağı önerilmiştir. Önerilen yöntemin etkinliği Karar Ağaçları Regresyon, Rastgele Orman Regresyon, Gradyan Güçlendirme ve K-En Yakın Komşu gibi en etkili makine öğrenme algoritmaları ile karşılaştırılmıştır. LSTM modelinin yaklaşımının etkinliğini doğrulamak için Çorum - Türkiye'de Temmuz-1983 ve Aralık-2018 tarihleri arasında global güneş ışınımı sıralı zaman serileri verileri kullanılmıştır. Simülasyon sonuçları, LSTM yönteminin diğer makine öğrenme modellerinden daha iyi performansa sahip olduğunu göstermektedir.

Global Solar Irradiance Time Series Prediction Using Long Short-Term Memory Network

Abstract

Global solar radiation estimation is increasingly acquiring more importance to ensure effective management and operation of solar energy systems as well as providing reliable information about the future power generation. In this study, the Long Short-Term Memory (LSTM) has been suggested to effectively model the daily solar radiation prediction problem. The effectiveness of the suggested method compared with the state of the art machine learning algorithms such as Decision Tree Regression, Random Forest Regression, Gradient Boosting and K-Nearest Neighbor. Daily solar irradiance sequential time series data in Çorum - Turkey between January-1983 and December-2018 have been used to validate the effectiveness of the suggested LSTM method. The simulation outcomes demonstrate that LSTM method has generally better performance than the other machine learning models.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde insanlar tarafından kullanımı her geçen gün artan petrol ürünleri, doğalgaz ve kömür gibi fosil yakıtların, dünya üzerinde ozon tabakasının delinmesi, küresel ısınma, havanın kirlenmesi sonucunda meydana gelen asit yağmurları ve çevre kirliliği gibi etkileri dünya üzerinde telafisi mümkün olmayan sonuçlara neden olmaktadır [1].

Fosil yakıtların kullanımından kaynaklanan çevresel sorunlar, sürekli artan enerji talebi ve insan sağlığı üzerindeki olumsuz etkilerinden dolayı yenilenebilir enerji kaynaklarına yapılan yatırımları arttırmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları arasında en yaygın olarak kullanılanlar arasında güneş enerjisi gelmektedir. Güneş enerjisi, tükenmeyen ve çevreyi kirletmeyen doğal bir enerji kaynağı olması nedeniyle yaşamın sürdüğü tüm alanlarda kullanılabilir. Güneş enerjisi uygulamalarının ve sistemlerinin fizibilite çalışmaları için, sağlıklı ve kolay ulaşılabilir olmasından dolayı güneş ışınım değerlerinin tahmini gerekmektedir [2]. Bu çalışmada, dünya yüzeyine düşen günlük güneş ışınım değerlerinin tahmini için son

yıllarda araştırmacılar tarafından sıklıkla kullanılan Derin öğrenme yaklaşımlarından LSTM yöntemi uygulanmıştır.

Yapay zekâ alanında son yıllarda üzerinde durulan yeni bir makine öğrenme yöntemi olan derin öğrenme, büyük miktarda verilerden etkili özellik temsillerinin öğrenilmesine katkı sağlayan etkin algoritmalar sunmaktadır [3]. Derin öğrenme modelleri, özellikle hisse senedi fiyat tahmini, hava kirliliği tahmini ve enerji fiyatları tahmini gibi zaman serileri tahmini problemlerinde yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Zaman serisi tahmin sistemleri, geçmiş ve şimdiki durum bilgilerine dayanarak gelecekteki davranışları öngörmeye dayanır. Geçmişte, zaman serileri problemlerinin çözümü için lineer istatistiksel yöntemler sunulurdu. Günümüzde ise veri boyutunun artmasıyla karmaşık ve lineer olmayan zaman serileri tahminleri için lineer istatistiksel yöntemler yetersiz kalmaktadır [4]. Ayrıca zaman serisi verilerinden manuel olarak etkin özelliklerin belirlenmesinin zor olmasından dolayı, verilerdeki karmaşıklık ve lineer olmayan ilişkileri öğrenme kabiliyetine sahip Derin yapay sinir ağları önerilmiştir. Derin sinir ağları algoritmaları arasında LSTM, zaman serileri tahmininde geniş çapta kullanılmaktadır.

LSTM, tekrarlayan sinir ağları mimarisinin özel bir türü olarak Hochreiter ve Schmidhuber [5] tarafında geliştirilmiştir. LSTM algoritması, zaman serileri verilerinden otomatik özellik çıkarma yeteneği ve karmaşık lineer olmayan durumları öğrenmesi ile dikkat çekmektedir.

Bu çalışmada, doğrusal olmayan ve karmaşık güneş ışıınımı verilerinin tahmini için derin LSTM mimarisi önerilmiştir. Güneş ışıınımı değerlerinin tahmini için Çorum ilinin Temmuz-1983 ve Aralık-2018 tarihleri arasındaki sıralı zaman serisi verileri kullanılmıştır. Önerilen derin öğrenme yaklaşımı, orijinal Tekrarlayan sinir ağları (Recurrent neural network - RNN) modelinin bir uzantısıdır; burada, her bir katman birden fazla nöron içerecek şekilde çoklu LSTM katmanları içerir. Ayrıca LSTM modelinin sonuçlarının doğruluğunu ve etkinliğini değerlendirmek için makine öğrenmesi algoritmaları ile karşılaştırılmıştır.

2. İLGİLİ ÇALIŞMALAR (RELATED WORK)

Güneş ışıınının, güneş enerjisinin elde edilmesi ile doğru orantılı olması ve güneş enerjisi üretiminde dikkate alınacak bir parametre olması nedeniyle literatürde güneş ışıınımı tahmini yoğun olarak incelenmiştir. Tahmin yöntemleri kabaca üç kategoriye ayrılabilir: fiziksel, istatistiksel ve makine öğrenmesi yöntemleri [6]. Fiziksel yöntemde, tahmin, uzun bir tahmin periyotları (1 ve 2 gün) için daha uygun olan sayısal hava tahmin modelleri ile uygulanır. İstatistiksel yöntemler ise geçmiş zaman serileri verilerine dayanır. Yapay zeka algoritmasının bir alt dalı olan makine öğrenmesi, girdi-çıkı verileri arasındaki lineer olmayan ilişkiyi verilerden öğrenir. Bu çalışmada, güneş ışıınım değerlerinin tahmini için derin öğrenme yaklaşımı uygulanacaktır ve bu yaklaşım makine öğrenmesi algoritmaları ile karşılaştırılacaktır.

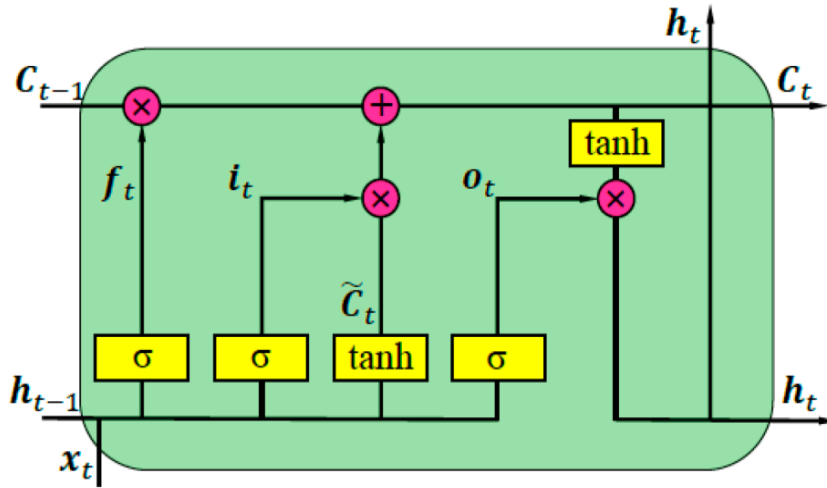
Güneş ışıınım tahmin problemi için literatürde; meta-sezgisel algoritmalar, bulanık mantık ve yapay sinir ağları ve karma (hybrid) sistemler gibi yapay zekâ ve istatistiksel yöntemler kullanılmıştır [7-10]. Pedro vd. [11] tarafından yapılan bir çalışmada güneş enerjisi tahmininde farklı makine öğrenmesi yaklaşımlarının performansları değerlendirilmiştir. Arslan vd. tarafından Mersin ilinin güneş ışıınım değerlerini yapay sinir ağı kullanılarak tahmin etmişlerdir [12]. Ayrıca güneş ışıınım değerlerinin tahmininde; Destek Vektör Makinası (Support Vector Machines - SVM), Rastgele Orman Regresyon (Random Forest Regression - RFR), K-Nearest Neighbor Regresyon (kNN Regression - KNN), Aşırı Öğrenme Makinesi (Extreme Learning Machine - ELM) gibi birçok makine öğrenmesi algoritması kullanılmıştır [9, 13, 14].

Zaman serisi problemlerinin analizlerinde, son yıllarda araştırmacılar tarafından tercih edilen LSTM yöntemi kompleks ve lineer olmayan verilerin tahmin tutarlılığında ciddi iyileştirmeler sağlamıştır. Sagheer ve Kotb [4] yaptıkları çalışmada petrol fiyatlarının tahmini için LSTM algoritmasını kullanmışlardır. Bouktif vd. ise LSTM parametre optimizasyonu için genetik algoritma yaklaşımı sunmuştur [15]. Bunların yanında finans piyasalarında hisse senetlerinin fiyat tahminleri LSTM algoritmasının performansı incelenmiştir [16, 17]. Son yıllarda literatürde, hava kirliliği tahmini, su kalitesinin tahmini ve ozon gazları yoğunluğunun tahmini gibi çevresel zaman serisi problemlerinde tahmin doğruluğunun yüksekliğinden dolayı LSTM yaklaşımı tercih edilmiştir [3, 18]. Qing ve Niu [19] yaptıkları çalışmada, saatlik güneş ışıınımı değerlerinin tahmini LSTM yöntemi kullanmışlar ve girdi verileri olarak aynı zaman dilimine ait hava tahmin değerleri kullanılmıştır. Alzahrani vd. [20] ise güneş ışıınım değerlerinin tahmini için derin

sinir ağırları kullanmışlardır. Bu çalışmada ise Çorum ilinin güneş ışınım değerlerinin derin sinir ağı yaklaşımı olan RNN mimarisinin özel bir türü olan LSTM algoritması kullanılmıştır. Ayrıca LSTM algoritmasına girdi verisi olarak geçmiş güneş ışınım değerlerinin farklı zaman periyodları kullanılmıştır.

3. UZUN KISA SÜRELİ BELLEK (LONG-SHORT TERM MEMORY)

Uzun kısa süreli bellek, sıralı verilerin modellenmesi için uygulanan RNN yaklaşımının özel bir türü olarak 1990 yılların sonunda geliştirilmiştir. RNN yaklaşımında genel olarak, girdi verisindeki her bir bilgi bir önceki çıktının değerini de dikkate alarak tekrarlı olarak inceler. Bu mimaride önceki zaman dilimindeki bilgileri göz önüne alan bir öğrenme gerçekleştirdiği iddia edilmesine rağmen gradyan kaybolması/patlaması sorunu sebebi ile bunun mümkün olmadığı belirtilmiştir [5, 21]. Bu sorunun üstesinden gelmek için uzun süreli bilgiyi hatırlayabilen LSTM mimarisi geliştirilmiştir.



Şekil 1. Uzun kısa süreli hafıza mimari yapısı [22].

LSTM mimarisi, Şekil 1'de gösterildiği gibi birbirini tekrar eden sıralı bloklardan oluşur. Genel olarak LSTM yapısında unut, girdi ve çıktı olmak üzere 3 farklı katmandan oluşur. LSTM mimarisinde öncelikle girdi olarak X_t ve h_{t-1} bilgileri kullanılarak hangi bilgilerin silineceğine karar verilir. Bu işlemler unut katmanında (f_t) Eşitlik (1) kullanılarak yapılır ve aktivasyon fonksiyonu olarak sigmoid kullanılır.

$$f_t = \sigma(W_{f,x} * X_t + W_{f,h} * h_{t-1} + b_f) \quad 1$$

İkinci adımda yeni bilgilerin belirleneceği girdi katmanı devreye girer ve öncelikle (i_t) Eşitlik (2) kullanılarak *sigmoid* fonksiyonu ile bilgiler güncellenir. Ardından Eşitlik (3) ile yeni bilgiyi oluşturacak aday bilgiler *tanh* fonksiyonu tarafından belirlenir.

$$i_t = \sigma(W_{i,x} * X_t + W_{i,h} * h_{t-1} + b_i) \quad 2$$

$$\tilde{C}_t = \tanh(W_{c,x} * X_t + W_{c,h} * h_{t-1} + b_c) \quad 3$$

Eşitlik (4) tarafından yeni bilgiler oluşturulur.

$$C_t = C_{t-1} * f_t + i_t * \tilde{C}_t \quad 4$$

Son olarak çıktı katmanında Eşitlik (5) ve (6) kullanılarak çıktı verileri elde edilir.

$$o_t = \sigma(W_{o,x} * X_t + W_{o,h} * h_{t-1} + b_o) \quad 5$$

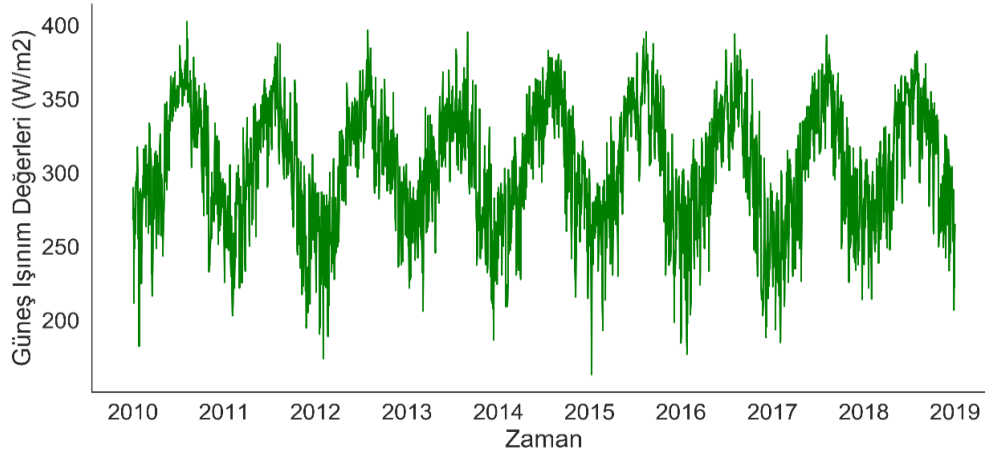
$$h_t = o_t * \tanh(C_t) \quad 6$$

Yukarıda ifade edilen süreç tekrarlanarak devam eder. Ağırlık parametreleri (W) ve bias parametreleri (b) gerçek eğitim değerleri ile LSTM çıktı değerleri arasındaki farkı minimize edecek şekilde model tarafından öğrenilmektedir [4, 17, 23].

4. VERİ VE DENEYSEL ÇALIŞMALAR (DATA AND EXPERIMENTAL STUDIES)

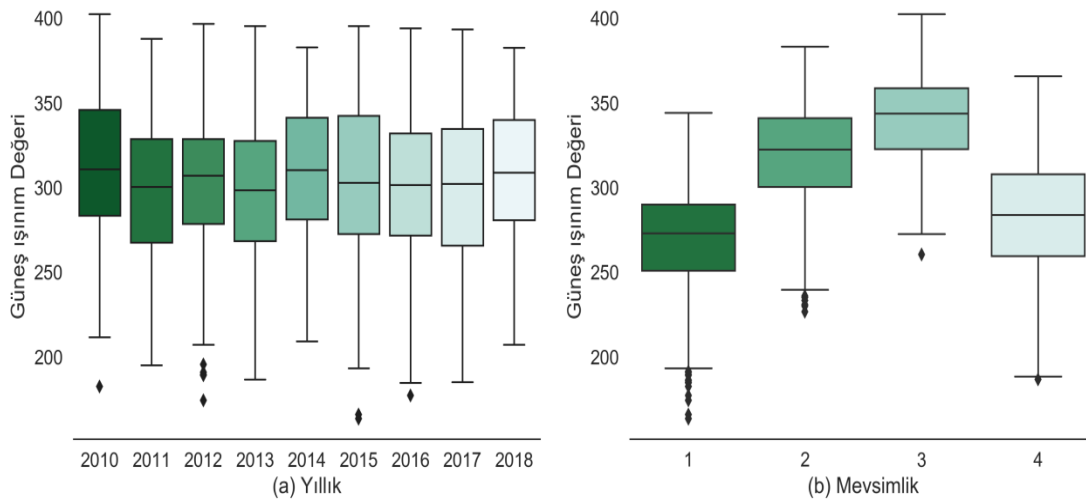
4.1. Veri Tanımı (Data Description)

Bu bölümde, güneş ışınımı değerlerinin LSTM yöntemi ile tahmininde kullanılacak veri kümesinden, verilerin hazırlanması sürecinden, LSTM yönteminden elde edilen sonuçlarının doğruluğunun testi için karşılaştırma yapılacak makine öğrenmesi algoritmalarından ve son olarak eğitim verisi ile test verilerinin oluşturulmasından bahsedilecektir.



Şekil 2. Çorum ili güneş ışınım değerleri (2010-2018)

Bu çalışmada, Çorum ilinin Temmuz-1983 ve Aralık-2018 tarihleri arasındaki günlük güneş ışınım değerleri kullanılmıştır. Bu veriler Amerika'nın Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi (NASA) tarafından yayınlanan POWER (Prediction Of Worldwide Energy Resource) proje veri setinden elde edilmiştir (<https://power.larc.nasa.gov/>). Kullanılan veri seti 12969 adet kayıt içermektedir. Bu verilerin % 80'i eğitim verisi geriye kalan % 20'lik veri ise test verisi olarak değerlendirilmiştir. Çorum ilinin 2010-2018 tarihleri arasındaki güneş ışınım değerlerinin zamana bağlı grafiği Şekil 2'de sunulmuştur.



Şekil 3. Güneş ışınım kutu grafiği (a) Yıllık (b) Mevsimlik

Çorum ilinin güneş ışınım değerlerinin kutu grafikleri Şekil 3'de gösterilmiştir. Yıllara göre ortalama değerlerinin (Şekil 3a) neredeyse aynı olduğu görülmektedir. Fakat güneş ışınım değerlerini mevsimlere göre incelendiğinde (Şekil 3b) yaz aylarında daha yüksek olurken sonbahar ve kış aylarında daha düşük olduğu görülmektedir.

4.2. Karşılaştırma Modelleri ve Performans Ölçümleri (The Benchmark Models And Performance Measurements)

Güneş ışınımı değerlerinin tahmini için önerilen LSTM algoritmasından elde edilen sonuçların performansını ve doğruluğunu karşılaştırmak amacıyla literatürde var olan bazı makine öğrenmesi algoritmaları seçilmiştir. Seçilen makine öğrenmesi algoritmaları şunlardır; Rastgele Orman Regresyon (Random Forest Regression) [24], K-En Yakın Komşu (K-Nearest Neighbor) [25], Gradyan Güçlendirme (Gradient Boosting) [26] ve Karar Ağaçları Regresyon (Decision Tree Regression) [27]. Seçilen makine öğrenmesi algoritmalarının temel parametreleri Tablo 1’de gösterilmiştir. Bu parametreler Bouktif vd. [15] tarafından yapılan çalışmadan alınmıştır.

Tablo 1. Seçilen yöntemlerin parametre değerleri

No	Model	Parametreler
1	K-En Yakın Komşu	Komşu sayısı $n = 5$, ağırlık fonk. = uniform, mesafe ölçütü = Öklid
2	Rastgele Orman Regresyon	Ağaç sayısı = 125, ağacın max derinliği = 100, min samples split = 4, min sample leaf = 4
3	Gradyan Güçlendirme	Estimator sayısı = 125, max derinlik = 100, min samples split = 4, min sample leaf = 4
4	Karar Ağaçları Regresyon	Ağacın max derinliği = 100, min samples split = 4, min sample leaf = 4

Bu makalede kullanılan modellerde, kayıp fonksiyon olarak Ortalama Hata Kareleri (mean squared error - MSE) ölçütü tercih edilmiştir. Kayıp fonksiyon, modelin hata oranını diğer bir ifade ile başarı oranını ölçmektedir. Modellerin tahmin değeri ile gerçek değerler arasındaki farkı minimize edecek şekilde uygun model parametreleri belirlenir. Bu makalede kullanılan modellerde, kayıp fonksiyon olarak Ortalama Hata Kareleri (mean squared error - MSE) ölçütü tercih edilmiştir. MSE, gerçek değer ile tahmin değeri arasındaki ortalama kare farkıdır ve aşağıdaki Eşitlik (7) kullanılarak formülize edilir.

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (o_i - p_i)^2 \quad 7$$

Yukarıdaki eşitliklerde kullanılan N örnek sayısı, o_i i. gözlemin gerçek değeri, p_i i. gözlemin tahmin değeri ve \bar{o} ise gerçek gözlem değerlerinin ortalamasını ifade etmektedir. Bütün modellerde aynı eğitim ve test verileri kullanılmıştır.

Çorum ilinin günlük güneş ışınım değerlerinin tahmini için önerilen LSTM modelin mimarisi sırasıyla; bir tane girdi katmanı (input layer), 128 nörondan oluşan gizli katman (hidden layer), 0.2 oranında seyreltme (dropout) katmanı, 64 nörondan oluşan gizli katman (hidden layer), 0.2 oranında seyreltme (dropout) katmanı, aktivasyon fonksiyonu *relu* olan 16 nörondan oluşan dense katmanı ve son olarak 1 nörondan oluşan dense katmanından oluşmaktadır. Girdi katmanı geçmiş 7 günlük (1 hafta) güneş ışınım değerlerini kullanmaktadır. Girdi ile çıktı katmanının ilgili nöronu arasında kayıp fonksiyon olarak MSE ölçütü uygulanmaktadır. Optimizasyon algoritması olarak ADAM [28] kullanılmıştır. Ayrıca modelin öğrenme sürecinde epoch sayısı 150 ve yığın sayısı (batch size) 32 olarak belirlenmiştir. Önerilen modelde toplam 117025 adet parametrenin optimizasyonu yapılmıştır.

Önerilen LSTM modelin tahmin performansını değerlendirmek için 4 farklı istatistiki değerlendirme ölçütü kullanılmıştır. Bu ölçütler:

Ortalama mutlak hata (mean absolute error - MAE): Tahmin değerleri ile gerçek değerler arasındaki farkın ortalama mutlak sapmasını ifade etmektedir ve Eşitlik (8) kullanılarak hesaplanır.

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |o_i - p_i| \quad 8$$

Ortalama karekök hata (root mean square error - RMSE): Genel olarak tahmin hatalarının standart sapmasını temsil etmektedir ve Eşitlik (9) kullanılarak hesaplanır.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (o_i - p_i)^2}{N}} \quad 9$$

Ortalama mutlak yüzde hata (mean absolute percentage error - MAPE): Modellerin tahmin doğruluğunu yüzdesel olarak ölçer ve Eşitlik (10) kullanılarak hesaplanır.

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{o_i - p_i}{o_i} \right| \quad 10$$

Belirleme katsayısı (coefficient of determination - r^2): Modellerin tahmin değerleri ile gerçek değerler arasındaki lineer ilişkinin gücünü temsil etmektedir ve Eşitlik (11) kullanılarak hesaplanır.

$$r^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (o_i - p_i)^2}{\sum_{i=1}^N (o_i - \bar{o})^2} \quad 11$$

İstatistiki değerlendirme ölçütlerinin için kullanılan Eşitlik (8) - (11)'deki N örnek sayısı, o_i i . gözlemin gerçek değeri, p_i i . gözlemin tahmin değeri ve \bar{o} ise gerçek gözlem değerlerinin ortalamasını ifade etmektedir.

Bu çalışmada, makine öğrenmesi ve derin öğrenme uygulamalarında yaygın olarak başvurulan Python v3.6.7 programlama dili kullanılarak kodlanmıştır. Önerilen modeller Keras v2.2.4 [29] ve Scikit-learn v0.20.1 [30] kütüphaneleri kullanılarak uygulanmıştır.

4.3 Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

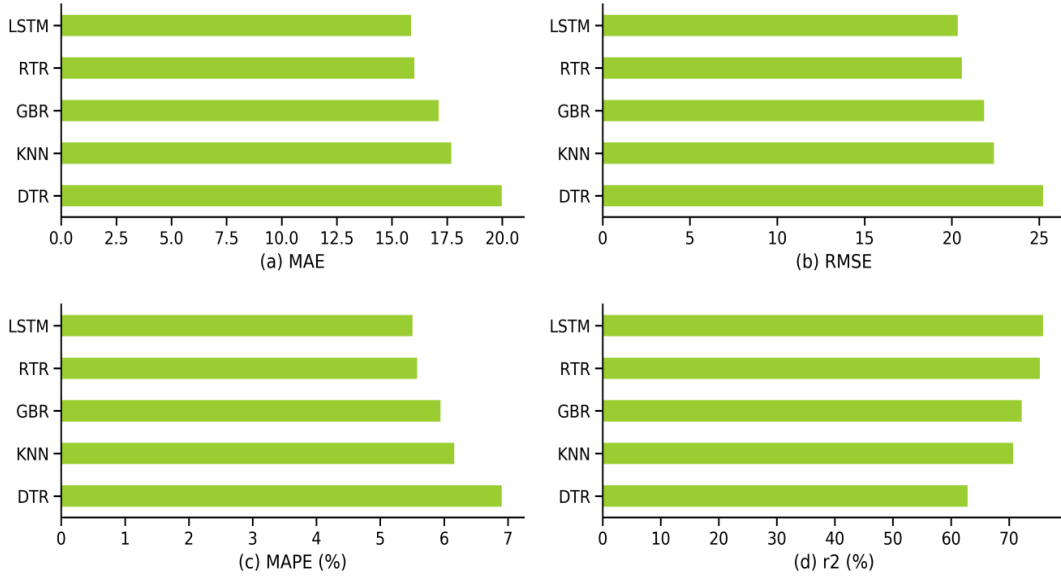
Bu kısımda, günlük güneş ışınım değerlerin tahmini için önerilen LSTM modelinin analizi ve değerlendirilmesi için yapılan benzetim çalışmalarından elde edilen sonuçlardan bahsedilecektir. Çorum ilinin güneş ışınım değerlerinin tahmini için önerilen LSTM ve diğer makine öğrenmesi modellerinde Y_t , t . gündeki tahmin edilen değeri ifade etmektedir. Bütün modellerde girdi bilgisi olarak geçmiş 7 güne ait güneş ışınım değerleri kullanılmaktadır.

Tablo 2. Modellerin performans karşılaştırması

		MAE	RMSE	MAPE (%)	r2
DTR	Değer	19.98	25.23	6.90	62.87%
	% Değişim	11.43%	11.18%	10.76%	12.47%
KNN	Değer	17.69	22.41	6.16	70.71%
	% Değişim	14.34%	13.42%	13.92%	14.79%
GBR	Değer	17.11	21.84	5.94	72.17%
	% Değişim	14.34%	13.42%	13.92%	14.79%
RTR	Değer	16.02	20.57	5.58	75.32%
	% Değişim	19.83%	18.47%	19.20%	19.80%
LSTM	Değer	15.87	20.34	5.51	75.88%
	% Değişim	20.56%	19.39%	20.25%	20.69%

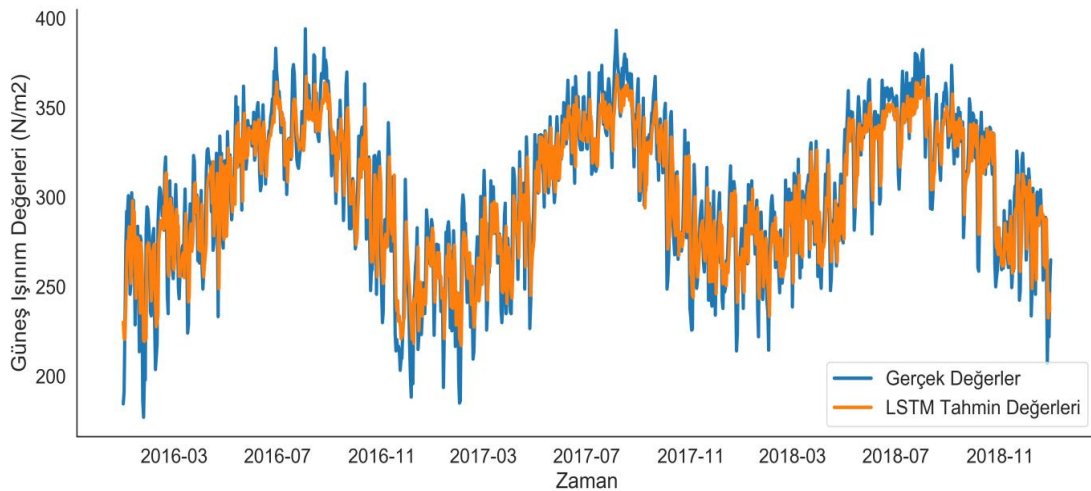
Öncelikle, LSTM modelinin tahmin hatalarını değerlendirmek için diğer makine öğrenmesi modellerinin tahmin hataları ile karşılaştırıldı. Tablo 2'de modellerin performanslarını değerlendirmek için kullanılan MAE, RMSE, MAPE ve r^2 ölçütlerinin değer ve % değişim oranları verilmiştir. "Değer" satırında modellerden elde edilen ilgili performans ölçütlerinin sonuçları gösterilmektedir. Tablonun "% Değişim" satırında ise en düşük performans değerlerine sahip olduğu için temel model olarak belirlenen Karar

ağaçları modeline göre % değişimleri ifade etmektedir. Genel olarak sonuçlar incelendiğinde LSTM modelinin bütün performans ölçütlerinde en iyi sonuçları verdiği gösterilmiştir ve Karar ağacı sonuçları ile karşılaştırıldığında genel olarak % 20 daha üstün performans sergilemiştir. Önerilen model en yüksek performansını % 75.88'lik r^2 değerinde göstermiştir ve Karar ağacı modeline göre % 20.69 daha üstün olduğu görülmektedir. LSTM yaklaşımının diğer performans ölçütleri incelendiğinde MAE değeri 15.87, MAPE değeri % 5.51 ve RMSE değeri ise 20.34 olarak gösterilmiştir. LSTM modeline yakın 2. en iyi sonuçları veren Rastgele ağaçlar modeli olmuştur. Rastgele ağaçlar modelinin MAE, RMSE, MAPE ve r^2 değerleri sırasıyla; 16.02, 20.34, % 5.58 ve % 75.32'dir.



Şekil 4. Modellere ait performans ölçütlerinin grafiksel gösterimi

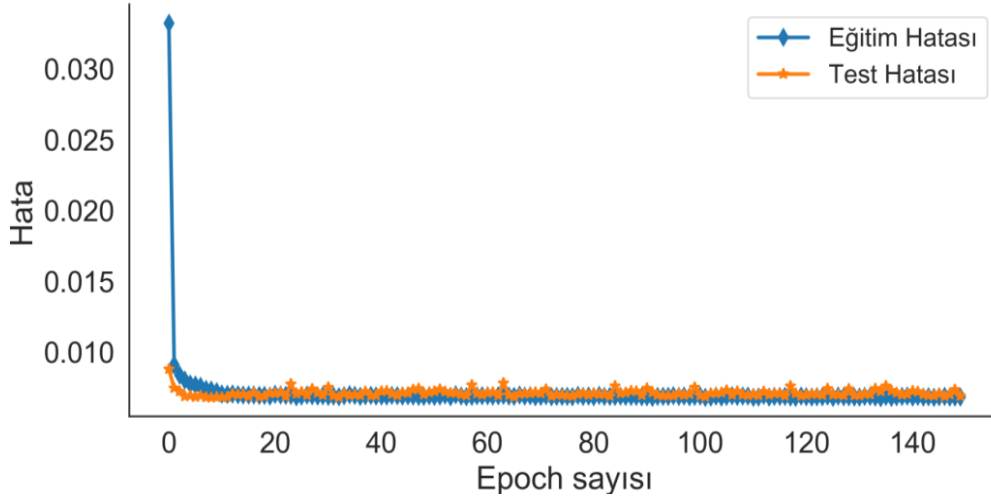
Şekil 4'de Derin öğrenme modeli ve makine öğrenmesi modellerinin performans ölçütleri değerlerinin grafiksel gösterimi verilmiştir. Şekilde de görüldüğü gibi tahmin hata ölçütleri olan MAE, MAPE ve RMSE değerlerinde en düşük sonuçları verirken belirlilik katsayısı olan r^2 değerinde en büyük yüzde değerini vermiştir. Diğer taraftan en düşük performans sergilen modelin Karar ağaçları olduğu söylenebilir. Genel olarak en iyi performansları gösteren modeller sırasıyla; LSTM, Rastgele ağaçları, K-En yakın komşu, Gradyan güçlendirme ve Karar ağaçlarıdır.



Şekil 5. Gerçek değerler ile LSTM modelin tahmin değerleri

Güneş ışınım değerlerinin tahmini için önerilen LSTM modelin tahmin değerleri ile gerçek değerleri gösteren zaman grafiği Şekil 5'de gösterilmiştir. Mart-2016 ve Aralık-2018 tarihleri arasındaki test

verilerinin gerçek değerleri ve LSTM tahmin değeri grafikte kullanılmıştır. LSTM modelin tahmin değerlerinin gerçek değerlere ile karşılaştırıldığında bir tutarlılık olduğu görülmektedir. Ayrıca tahmin ve gerçek değerlerin aynı eğilimi gösterdiği belirtilmiştir. Grafığe bakıldığında, 200 N/m² ile 350 N/m² değerleri dışındaki gerçek değerlerden göreceli olarak boşluklar olduğu söylenebilir.



Şekil 6. LSTM öğrenme eğrisi

Bu çalışmada önerilen modelin Aşırı öğrenme (Overfit) problemini önlemek için her bir epoch periyodunda eğitim örnekleri rastgele karıştırılmıştır. Bu durum modelin genelleme işlevini iyileştirmeye yardımcı oldu. Ayrıca modele doğruluk oranı önceden belirlenen miktarda tekrarlandığında erken durdurma kullanıldı. Bu yaklaşımlar modelin aşırı öğrenmesini azaltmada önemli derecede etkili olmuştur. Şekil 6'da önerilen modelin öğrenme eğrisi gösterilmektedir.

4. SONUÇ (CONCLUSION)

Yenilenebilir enerji kaynaklarından olan güneş enerjisinin elde edilmesi için kurulacak tesislerin fizibilite çalışması ile bu tesislerdeki çıktının planlaması ve yönetiminde güneş ışınım değerlerinin tahmini dikkate değer bir meseledir. Bu çalışmada, günlük güneş ışınım değerlerini tahmin etmek için derin öğrenme yaklaşımı olan LSTM modeli önerilmiştir. Önerilen modeli eğitmek ve performans değerlendirmesini yapmak için Çorum ilinin Temmuz-1983 ve Aralık-2018 tarihleri arasındaki 12969 adet günlük güneş ışınım verileri kullanılmıştır. Bu veriler, eğitim ve test setleri olmak üzere iki gruba taksim edilmiştir. Eğitim verileri sadece modelin öğrenme sürecinde kullanılırken, test verileri öğrenme sürecinde kullanılmamıştır. Modelin öğrenme süreci tamamlandıktan sonra algoritmanın performans değerlendirmesi yapılırken test verileri kullanılmıştır.

Derin öğrenme yaklaşımı olan LSTM modelin sonuçlarının doğruluğunu ve performansını değerlendirmek ve analiz etmek için literatürdeki en gelişmiş makine öğrenmesi algoritmaları olan Rastgele ağaçlar, K-En yakın komşu, Gradyan güçlendirme ve Karar ağaçları modelleri ile karşılaştırıldı. Yapılan benzetim çalışmaları sonucunda, önerilen LSTM modelinin tahmin performansı geleneksel makine öğrenmesi modelleri ile karşılaştırıldığında MAE, MAPE, RMSE ve r^2 performans ölçütlerinin hepsinde daha etkin değerler vermiştir. Diğer tarafta karar ağaçları modeli ise bütün kriterlerde en kötü performansı sergilemiştir. Önerilen LSTM modeli, Karar ağaçları modeli ile karşılaştırıldığında MAE, RMSE, MAPE ve r^2 kriterlerinde sırayla % 20.56, % 19.36, % 20.25 ve % 20,69 düzeyinde daha üstün sonuç göstermiştir.

Son olarak, gelecekteki çalışmalarda güneş ışınım verilerinin tahmin edilmesinde sıcaklık, rüzgâr hızı, basınç gibi özelliklerinin değerlendirmeye alınarak modelin geliştirilmesi düşünülmektedir. Ayrıca LSTM modelinin parametrelerinin meta-sezgisel algoritmalar kullanılarak optimize edilmesi önerilebilir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Öztürk, M., Özek, N., & Berkama, B. (2012). Isparta için aylık ortalama günlük global güneş radyasyonu tahmininde mevcut olan bazı modellerin karşılaştırılması. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 18(1), 13-27.
- [2] Mengeş, H. O., & Sonmete, M. H. (2005). Konya'da aylık ortalama toplam güneş ışınımının tahmini için mevcut bazı modellerin karşılaştırılması. *Tarım Makinaları Bilimi Dergisi*, 1(3), 237-244.
- [3] Wen, C., Liu, S., Yao, X., Peng, L., Li, X., Hu, Y., & Chi, T. (2019). A novel spatiotemporal convolutional long short-term neural network for air pollution prediction. *Science of The Total Environment*, 654, 1091-1099.
- [4] Sagheer, A., & Kotb, M. (2019). Time series forecasting of petroleum production using deep LSTM recurrent networks. *Neurocomputing*, 323, 203-213.
- [5] Hochreiter, S., & Schmidhuber, J. (1997). Long short-term memory. *Neural computation*, 9(8), 1735-1780.
- [6] Aggarwal, S. K., & Saini, L. M. (2014). Solar energy prediction using linear and non-linear regularization models: A study on AMS (American Meteorological Society) 2013–14 Solar Energy Prediction Contest. *Energy*, 78, 247-256.
- [7] Mellit, A., & Pavan, A. M. (2010). A 24-h forecast of solar irradiance using artificial neural network: Application for performance prediction of a grid-connected PV plant at Trieste, Italy. *Solar Energy*, 84(5), 807-821.
- [8] Lave, M., Kleissl, J., & Stein, J. S. (2012). A wavelet-based variability model (WVM) for solar PV power plants. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 4(2), 501-509.
- [9] Salcedo-Sanz, S., Casanova-Mateo, C., Pastor-Sánchez, A., & Sánchez-Girón, M. (2014). Daily global solar radiation prediction based on a hybrid Coral Reefs Optimization–Extreme Learning Machine approach. *Solar Energy*, 105, 91-98.
- [10] Yadav, A. K., Malik, H., & Chandel, S. S. (2014). Selection of most relevant input parameters using WEKA for artificial neural network based solar radiation prediction models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 31, 509-519.
- [11] Pedro, H. T., Coimbra, C. F., David, M., & Lauret, P. (2018). Assessment of machine learning techniques for deterministic and probabilistic intra-hour solar forecasts. *Renewable Energy*, 123, 191-203.
- [12] Arslan, G., Bayhan, B., & Yaman, K. Mersin/Türkiye için Ölçülen Global Güneş Işınımının Yapay Sinir Ağları ile Tahmin Edilmesi ve Yaygın Işınım Modelleri ile Karşılaştırılması. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 7(1), 80-96.
- [13] Fernández, Á., Gala, Y., & Dorronsoro, J. R. (2014, September). Machine learning prediction of large area photovoltaic energy production. In *International Workshop on Data Analytics for Renewable Energy Integration* (pp. 38-53). Springer, Cham.
- [14] Gala, Y., Fernández, Á., Díaz, J., & Dorronsoro, J. R. (2016). Hybrid machine learning forecasting of solar radiation values. *Neurocomputing*, 176, 48-59.
- [15] Bouktif, S., Fiaz, A., Ouni, A., & Serhani, M. (2018). Optimal deep learning lstm model for electric load forecasting using feature selection and genetic algorithm: Comparison with machine learning approaches. *Energies*, 11(7), 1636.

- [16] Gunduz, H., Yaslan, Y., & Cataltepe, Z. (2017). Intraday prediction of Borsa Istanbul using convolutional neural networks and feature correlations. *Knowledge-Based Systems*, 137, 138-148.
- [17] Fischer, T., & Krauss, C. (2018). Deep learning with long short-term memory networks for financial market predictions. *European Journal of Operational Research*, 270(2), 654-669.
- [18] Kim, K., Kim, D. K., Noh, J., & Kim, M. (2018). Stable Forecasting of Environmental Time Series via Long Short Term Memory Recurrent Neural Network. *IEEE Access*, 6, 75216-75228.
- [19] Qing, X., & Niu, Y. (2018). Hourly day-ahead solar irradiance prediction using weather forecasts by LSTM. *Energy*, 148, 461-468.
- [20] Alzahrani, A., Shamsi, P., Dagli, C., & Ferdowsi, M. (2017). Solar irradiance forecasting using deep neural networks. *Procedia computer science*, 114, 304-313.
- [21] Pascanu, R., Mikolov, T., & Bengio, Y. (2013, February). On the difficulty of training recurrent neural networks. In *International conference on machine learning* (pp. 1310-1318).
- [22] Xiao, Y., & Yin, Y. (2019). Hybrid LSTM Neural Network for Short-Term Traffic Flow Prediction. *Information*, 10(3), 105.
- [23] Ayata, D., Saraçlar, M., & Özgür, A. (2017, May). Political opinion/sentiment prediction via long short term memory recurrent neural networks on Twitter. In *2017 25th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)* (pp. 1-4). IEEE.
- [24] Liaw, A., & Wiener, M. (2002). Classification and regression by randomForest. *R news*, 2(3), 18-22.
- [25] Hastie, T., & Tibshirani, R. (1996). Discriminant adaptive nearest neighbor classification and regression. In *Advances in Neural Information Processing Systems* (pp. 409-415).
- [26] Friedman, J. H. (2002). Stochastic gradient boosting. *Computational statistics & data analysis*, 38(4), 367-378.
- [27] Gunaydin, O., Ozbeyaz, A., & Soylemez, M. (2019). Estimating California Bearing Ratio Using Decision Tree Regression Analysis Using Soil Index and Compaction Parameters. *International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering*, 7(1), 30-33.
- [28] Kingma, D. P., & Ba, J. (2014). Adam: A method for stochastic optimization. *arXiv preprint arXiv:1412.6980*.
- [29] F. Chollet, Keras, (2015). GitHub repository, <https://github.com/fchollet/keras>.
- [30] Pedregosa, Fabian, et al. (2011). Scikit-learn: Machine learning in Python. *Journal of machine learning research*, 12(Oct), 2825-2830.

Design of a Novel Three-Phase Transverse Flux Disc Generator and Optimization of Cogging Torque

 Burak CAN^{1*}  Emin YILDIRIZ² 
¹ Duzce University Faculty of Eng., Department of Electrical Electronics Engineering, 81620, Konuralp/DUZCE

² Duzce University Faculty of Eng., Department of Electrical Electronics Engineering, 81620, Konuralp/DUZCE

Graphical/Tabular Abstract

Article Info:

Research article

Received: 08/08/2019

Revision 10/10/2019

Accepted: 21/10/2019

Highlights

- Wind generator
- Transverse flux machine.
- High torque density

Keywords

 Transverse Flux
 Disc Generator
 Finite Element Method
 Cogging Torque

In direct driven wind turbines, multi-pole generators with high torque density are preferred. The new generation transverse flux machine (TFM) topologies have attracted the attention of designers with these features in recent years. In this study, a new disc type TFM has been proposed for use in low power direct drive wind turbines.

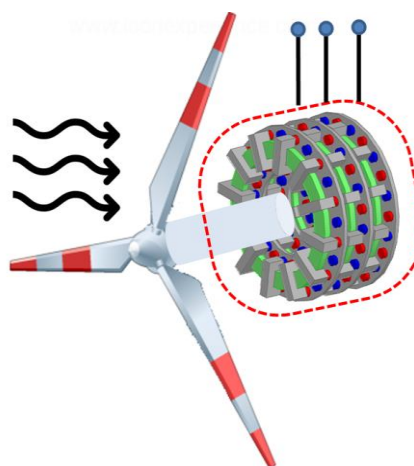


Figure A. Use of 3-phase disc type TFM in a direct drive wind turbine

Purpose: In this study, electromagnetic analysis and performance of a new 3-phase TFM have been investigated. Firstly, the effect of inner diameter on the open-circuit voltage has been investigated. In the second stage; the cogging torque, which is the biggest disadvantage of TFMs, has examined.

Theory and Methods: In the first step, the structure and operation of the proposed new disc type TFM is explained. Standard U-core and circular magnet sizes are used for low-cost TFM design. The effect of the inner rotor diameter, which is one of the preliminary design parameters, on the voltage quality induced in the phase windings was investigated by the finite element method (FEM). Considering the production cost, the magnet skew method has been preferred to reduce cogging torque and the optimum skew angle has determined with FEM. Since the proposed new TFM machine has 3D magnetic fluxes and the leakage magnetic fluxes are also taken into account, FEM analyses require a very high mesh sensitivity. In order to increase the precision, analyses were performed on the symmetrical 1/6 part of the machine.

Results: The open-circuit phase winding voltage is similar to the sinusoidal form as the rotor inner diameter increases in the proposed new disc type generator. However, increasing the inner rotor diameter also increases the cogging torque. The diameter is chosen as 55 mm, considering both design parameters and constraints. The effect of the magnet skew on the cogging torque has examined parametrically at 0.5 degree intervals and the lowest cogging torque has observed as 0.38 Nm when the magnet pair was skewed 0.5 degree.

Conclusions: It is seen that the generator phase winding voltage of the proposed machine is in sinusoidal form and has a very low cogging torque compared to its similars in the literature. The novel disc-type TFM is suitable for use in direct-drive wind turbines.



Yeni bir 3 Fazlı Disk Tipi Enine Akılı Generatörün Tasarımı ve Vuruntu Momentinin Optimizasyonu

Burak CAN^{1,*}, Emin YILDIRIZ²

¹Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 81620, Konuralp/DÜZCE

²Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 81620, Konuralp/DÜZCE

Öz

Düşük güçlü doğrudan tahrikli rüzgar türbinlerinde genelde sürekli mıknatıslı senkron makineler tercih edilmektedir. Bu sürekli mıknatıslı makinelerde; geleneksel makine topolojilerinin dışında (eksenel ve radyal akılı), özel makine modelleri de literatürde önerilmiştir. Bunlardan biri de enine akılı makinedir. Yapısal özelliğinden dolayı enine akılı makinelerde, elektriksel yüklemeye ve manyetik yüklemeye doğrudan birbiri ile ilişkili değildir. Bu topolojide, kutup sayısı ve manyetik yüklemeye kolaylıkla artırılabilir. Bu nedenle robot kolları, elektrikli araçlar ve rüzgâr türbinleri gibi yüksek moment- düşük hız uygulamalarında öne çıkmaktadırlar. Bu çalışmada, yeni bir üç fazlı enine akılı disk generatör modeli tanımlanmıştır. Modelin çalışma prensibi ve elektriksel devre modeli açıklanmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak, önerilen generatör modelinin rotor iç çapına göre zıt-emk değişimi elde edilmiştir. Bir diğer tasarım parametresi olarak vuruntu momenti de incelenmiştir. Enine akılı makinelerin genel sakıncalarından olan yüksek vuruntu momenti, mıknatıs kaybı yöntemi kullanılarak 6 Nm'den 0,38 Nm'ye düşürülmüştür.

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 08/08/2019
Düzeltilme: 10/10/2019
Kabul: 21/10/2019

Anahtar Kelimeler

Enine Akılı
Disk Generatör
Sonlu Elemanlar Yöntemi
Vuruntu Momenti

Keywords

Transverse Flux
Disc Generator
Finite Element Method
Cogging Torque

Design of a Novel Three-Phase Transverse Flux Disc Generator and Optimization of Cogging Torque

Abstract

Permanent magnet synchronous machines are more preferred in low-power direct-driven wind turbines. In addition to conventional machine topologies with axial and radial flux, special machine models have also been proposed in the literature such as transverse flux machine (TFM). In TFM's, due to their structural properties, electrical loading and magnetic loading are not directly related. The number of poles and magnetic loads can be easily increased. For this reason, TFM's stand out in high torque-low speed applications such as robot arms, electric vehicles, and wind turbines. In this study, a new three-phase transverse flux disc generator model is introduced. The operation principle and the electrical circuit model are explained. The back-emf waveform is obtained according to the rotor inner diameter of the proposed generator model using the Finite Element Method. The cogging torque is also studied as another design parameter. The high cogging torque, which is one of the general drawbacks of TFM's, has been reduced from 6 Nm to 0.38 Nm by using magnet skew method.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Geleneksel elektrik makinelerinde indüklenen güç ve moment, elektriksel yüklemeye ve manyetik yüklemeye bağlıdır. Diğer bir ifadeyle, Herhangi bir elektrik makinesinin moment yoğunluğunu arttırmak için, ya manyetik akı yoğunluğu ya da endüvi sargı akımı arttırmalıdır. Manyetik akı yoğunluğunu etkileyen stator diş genişlikleri ile elektriksel yüklemeye etkileyen endüvi oluk genişliği aynı makine yüzeyini kullanırlar. Bu nedenle makine çapı sabitse, diş genişliği arttıkça oluk genişliği azalmaktadır. Aynı şekilde elektriksel yüklemeye arttırmak için oluk genişliği arttırılırsa, bu kez diş genişliği azalacağından manyetik akı yoğunluğu azalır. Sonuç olarak; geleneksel makinelerde, makine çapı sabitken bir parametreyi sabit tutup diğer parametreyi arttırmak çok zordur. Moment yoğunluğunu arttırmak için, malzeme özellikleri iyileştirilebilir, ancak bu durum da makine üretim maliyeti artar. Enine akılı makineler (EAM), bu noktada çok önemli bir topoloji olarak ortaya çıkmaktadır. EAM'lerde; elektriksel yüklemeye ve manyetik yüklemeye makinenin aynı yüzeyini kullanmaz, bu nedenle elektriksel ve manyetik yüklemeler doğrudan birbirine

bağlı değildir ve tasarımda serbestçe seçilebilirler. Bu da EAM'lerin farklı tasarımlara izin vermesi anlamına gelir. Örneğin; elektriksel yüklemeye sabitken, kutup sayısı kolayca arttırılarak moment yoğunluğu arttırılabilir. Bu özelliği ile EAM; elektrikli araçlar ve rüzgâr türbinleri gibi, düşük hız- yüksek moment uygulamalarında önemli bir tercih olarak günümüzde tasarımcıların dikkatini çekmektedir. Literatürde karşılaşılan ilk enine akılı makine de rüzgâr türbinlerinde kullanım için önerilmiştir [1].

EAM'ler, radyal ve aksel akılı makineler gibi sabit mıknatıslar ile uyarılır. Literatürde hibrit uyarımlı EAM de önerilmiştir [2]. Düşük akım yoğunluklu bir çalışmada; radyal, aksel ve enine akılı makine küçük elektriksel yüklerde sabit hız için karşılaştırılmıştır [3]. Buna göre; EAM'in güç faktörü, diğer makine topolojilerine göre düşüktür ve iyileştirilmelidir. Ancak, verim ve moment yoğunluğu açısından dikkat çekici bir performans gösterir. EAM'lerde güç faktörü 0.35-0.55 arasındadır [4]. Ancak farklı tasarımlar ve optimizasyon uygulamaları ile daha yüksek güç faktörleri elde edilebilir [5]. Bunun için moment yoğunluğundan ödün vermek gerekebilir [6]. EAM'lerin güç katsayısı, son yıllarda geleneksel makineler ile rekabet edilebilir seviyeye yükselmiştir [7], [8]. Disk tipi EAM'ler ise, hem yüksek güç faktörleri ile hem de basit yapıları ile tasarımcıların ilgisini çekmiştir [9-13]. Bu nedenle disk tipi enine akılı makineler, yeni topolojilerin geliştirilmesine imkân vermesi ile gelişime açık bir topoloji türüdür.

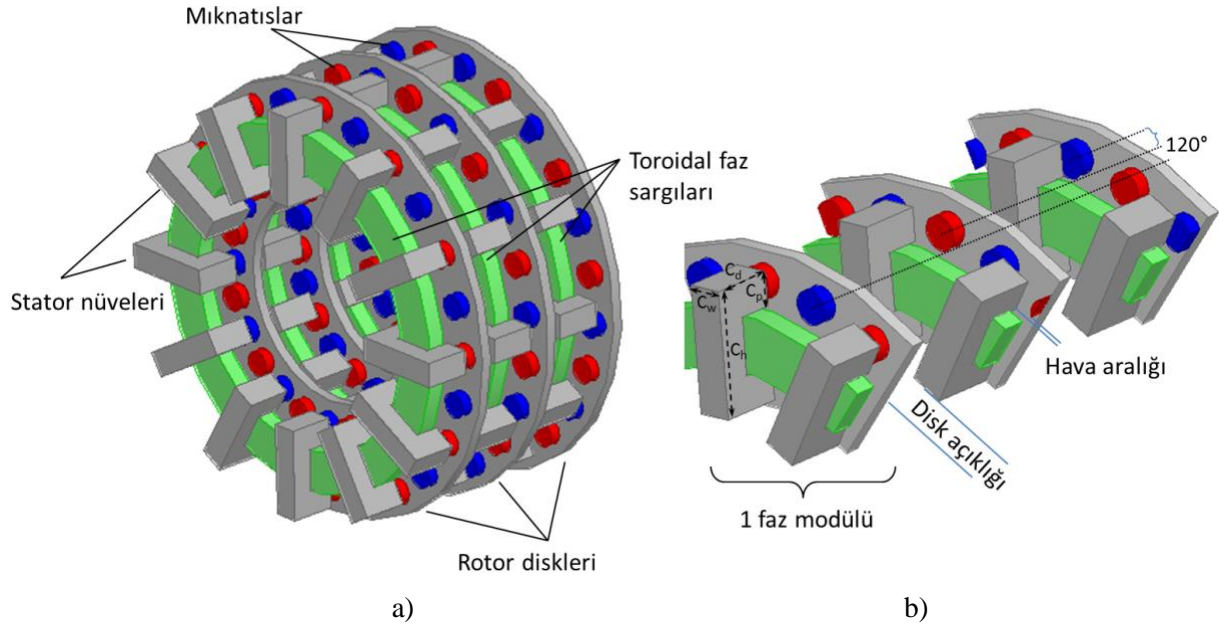
EAM'lerde vuru momentleri oldukça yüksektir, bu nedenle tasarımda vuru momentinin optimizasyonu önemli bir yer tutar. Mıknatıs ve stator dişleri arasındaki etkileşimden dolayı oluşan vuru momentleri, makine milinde moment dalgalanmalarına neden olur. Vuru momentleri, mil hızının bir fonksiyonudur [14]. Özellikle düşük hız uygulamalarında vuru momentinin etkisi incelenmelidir. Enine akılı disk tipi makinelerde vuru momentini azaltmak için; 120° elektriksel açı ile ardı ardına yerleştirilmiş, 3 tane tek fazlı disk yapıdan oluşan 3 fazlı modeller geliştirilmiştir [10, 13, 15]. Bunun yanında vuru momentini azaltmak için; stator nüvelerinde kaykırı [16] yapılacağı gibi, mıknatıslarda da kaykırı yapılabilir. Diğer makine topolojilerinde vuru momentini azaltma yöntemi olarak önerilen, asimetrik mıknatıs ve kutup kullanımı da denenebilir. Ancak bu durumda üretim zorlaşır ve maliyet artar. Sürekli mıknatıslı makinelerde vuru momentini azaltmanın bir başka yöntemi de, stator dişlerinde yardımcı oluklar açmaktır [17]. Bu çalışmada, disk tipi bir 3 fazlı enine akılı makinede vuru momentini azaltmak için mıknatıs kaykırı yöntemi dikkate alınmıştır. Manyetik akı yolları 3 boyutlu olduğundan, tüm analizler 3 boyutlu olarak gerçekleştirilmiştir. Mesh hassasiyetini arttırmak için, modelin simetrik $1/6$ 'lık parçasında analizler yapılmıştır.

Bu çalışmanın 2. bölümünde, önerilen makinenin çalışma prensibi ve genel yapısı açıklanmıştır. Durağan durumda, disk tipi EAM'nin manyetik akı yoğunluğu dağılımı ve açık devre faz gerilimleri 3. bölümde incelenmiştir. Rotor iç çapının zıt-emk'ya etkisi ortaya konulmuştur. Sürekli mıknatıslı makine tasarımında dikkat edilmesi gereken önemli konulardan olan vuru momentleri ise, 4.bölümde detaylı olarak analiz edilmiştir. Vuru momentinin optimizasyonu için, mıknatıs kaykırı yöntemi kullanılmış ve sonuçlar paylaşılmıştır. Önerilen disk tipi EAM'nin rüzgâr türbinleri ve elektrikli araçlar gibi düşük hız - yüksek moment uygulamalarında uygun olduğu sonucuna varılmıştır.

2. ENİNE AKILI DİSK MAKİNENİN YAPISI VE ÇALIŞMASI (STRUCTURE AND PRINCIPLE OF THE DISC TYPE TFM)

Önerilen 3 fazlı disk tip EAM, 120° elektriksel açı farklı olarak bir mil üzerine dizilmiş, 3 tane 1 fazlı modülden oluşur. Şekil 1'de, tüm makinenin 3D modeli ve kesit görünümü verilmiştir. 1 faza ait disk modüller arasında manyetik bir bağlantı yoktur. Bu nedenle, Şekil 1b'de gösterilen disk açıklığının elektriksel ve manyetik bir etkisi olmaz. 1 faza ait stator ve rotor arasındaki hava aralığı ise, her bir modülde 1 mm olarak alınmıştır. Her bir faz modülünde stator, 12 tane lamineli C nüveden (M36_26G) ve bu nüvelerin iç boşluğuna sarılmış bir adet toroidal faz sargısından oluşur. Üç faza ait toroidal faz sargıları, kendi aralarında yıldız bağlanmıştır. Her bir rotor da ise, çelik rotor diski üzerine yüzey yerleştirmeli olarak 24 kutup çifti için NdFeB30 sürekli mıknatıslar kullanılmıştır. Makinenin anma hızı 500 d/dk olduğundan yüzey yerleştirilmeli mıknatıslar açısından savrulma riski yoktur. Mıknatıslar ile beraber rotor diski, ferromanyetik olmayan bir rotor gövdesine gömülür. Statoru oluşturan C nüveler ve toroidal sargı da yine mekanik koruma amaçlı ferromanyetik olmayan bir malzeme ile kaplanır. (Şekil 1'de sadelik için dolgu malzeme gösterilmemiştir). C nüveler, ark şeklinde seçilmemiştir. Çünkü [18]'e göre, ark şeklindeki

nüvelerde güç faktörü daha düşüktür. Makine ön tasarımında kullanılan temel boyutlar Tablo 1’de verilmiştir.



Şekil 1. 3 fazlı disk tipi EAM'nin a) 3 boyutlu görünümü ve b) kesit görüntüsü

Tablo 1. Ön tasarım nüve, mıknatıs ve sargı boyutları

C Nüve boyutları		Mıknatıs boyutları		Faz sargı boyutları	
C_d (mm)	22	Çap (mm)	12	Tur sayısı	60
C_h (mm)	41	Yükseklik (mm)	5	Dış çap (mm)	99
C_w (mm)	12				

Rotor diskinin konumuna bağlı olarak, faz sargısını halkalayan manyetik akılar Şekil 2’de görülmektedir. Böylece rotor konumuna bağlı olarak, sinüs dalga şeklinde değişen bir akı bağı elde edilir. Makinenin basit manyetik eşdeğer devresi incelenirse; bir faz sargısında indüklenen gerilim kolayca elde edilebilir. Buna göre indüklenen gerilimin genel ifadesi ve etkin değeri sırasıyla eşitlik 1 ve 2’deki gibi yazılır. Burada φ_1 , bir faza ait bir kutup altındaki manyetik akının 1. harmoniğidir ve eşitlik 3’den hesaplanır. Buna göre bir faz sargısında indüklenen gerilim ifadesi, eşitlik 4’deki gibi olur. Burada τ ; ortalama kutup adımı, C_p ; stator kutup ayağının radyal uzunluğu, B_{g1} ; hava aralığı akı yoğunluğunun birinci harmoniği, K_a ; alan katsayısı [8] ve n ; d/dk cinsinden dönüş hızıdır.

$$e(t) = N_p \frac{d\varphi}{dt} = w_e N_p \varphi_{max} \cos(\omega t) \quad 1$$

$$E_{rms} = \frac{1}{\sqrt{2}} w_e N_p \varphi_1 \quad 2$$

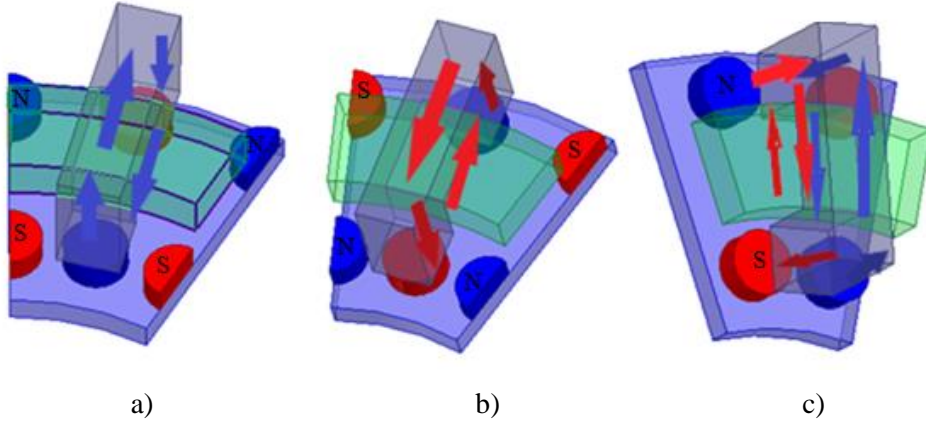
$$\varphi_1 = \frac{2}{\pi} \tau l_p B_{g1} K_a \quad 3$$

$$E_1 = \frac{\sqrt{2}}{60} p^2 N \tau C_p B_{g1} K_a n \quad 4$$

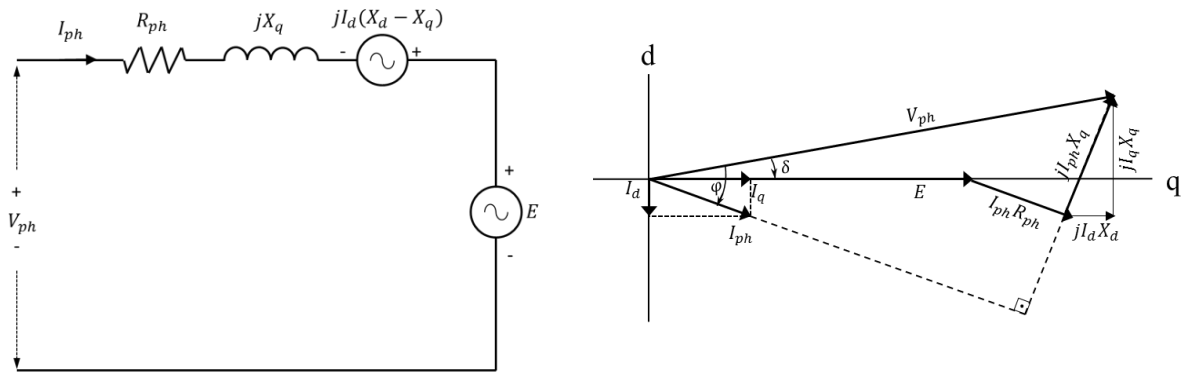
EAM'nin elektriksel eşdeğer devresi ve fazör diyagramı Şekil 3’te görülmektedir. Buna göre, genel güç eşitliği eşitlik 5’teki gibi bulunur [19]. Burada $E I_q$ ifadesi, elektromekanik gücü temsil eder. Buna göre moment eşitlik 6’daki gibi yazılır.

$$P_{input} = EI_q + I_d I_q (X_d - X_q) + R_{ph} I_{ph}^2 \quad 5$$

$$T = \frac{EI_q}{n2\pi/60} = \frac{\sqrt{2}}{2\pi} p^2 N \tau l_p B_{g1} K_a I_q \quad 6$$



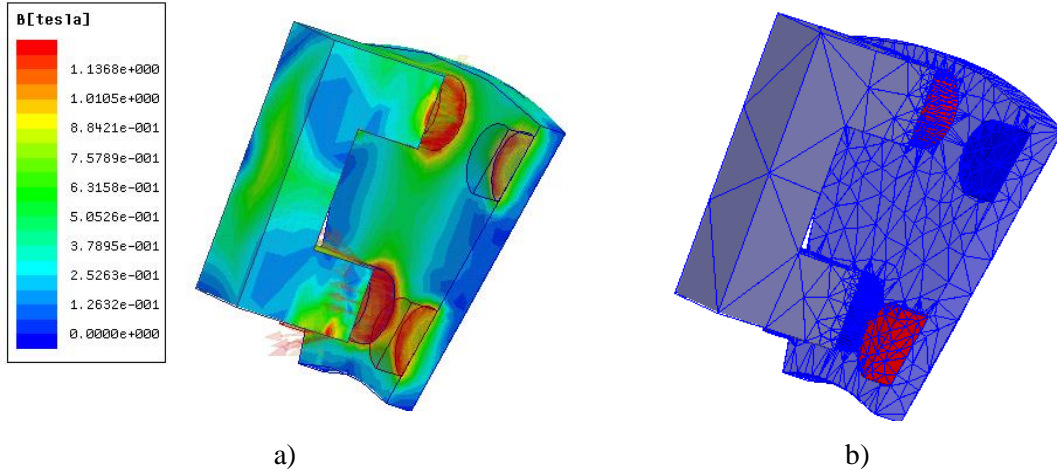
Şekil 2. Rotor konumuna göre mıknatıs akuların değişimi



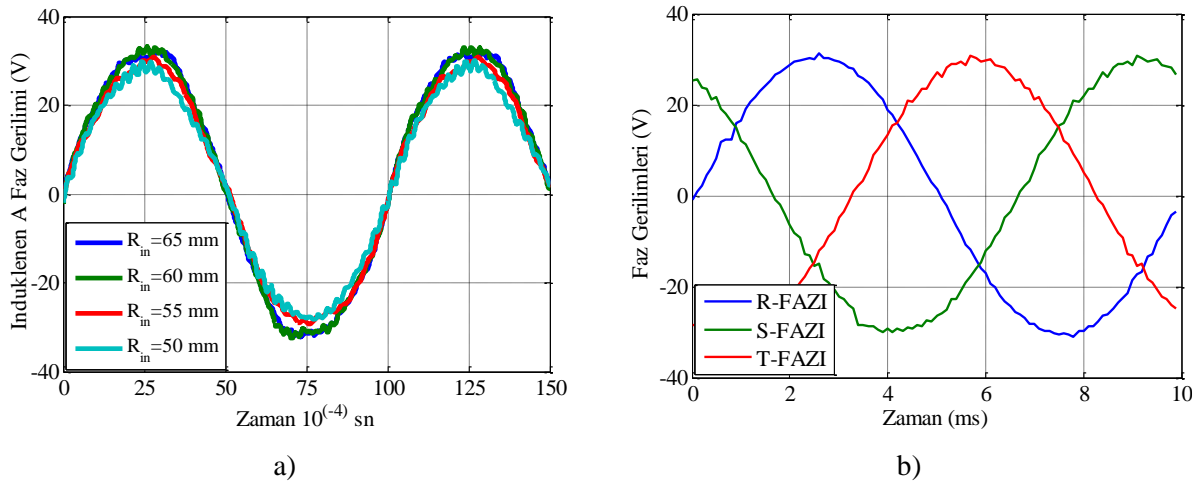
Şekil 3. EAM'nin eşdeğer devre modeli ve fazör diyagramı

3. ÖNERİLEN DİSK TİPİ EAM'NİN AÇIK DEVRE ELEKTROMANYETİK ANALİZİ (OPEN CIRCUIT ELECTROMAGNETIC ANALYSIS OF THE PROPOSED DISC TYPE TFM)

C nüveler rotordaki mıknatıslar ile aynı hizaya geldiğinde, hava aralığından kapanan mıknatıs akıları enine bir yol izeler. Ancak, nüveler kutuplardan uzaklaştıkça komşu iki mıknatıs arasında aksel kaçak akılar dolaşır. Bu nedenle önerilen disk tipi EAM'nin sonlu elemanlar yöntemi ile analizi yapılırken 3D model dikkate alınmalıdır. Şekil 4'te, oluşturulan 1/6 simetrik modeldeki mesh dağılımları ve akı yoğunluğu görülmektedir. Rotor iç çapı arttıkça, yanındaki mıknatıstan kısa devre olan mıknatıs akı miktarı azalmaktadır. Şekil 5'te farklı iç yarıçaplar için faz başına indüklenen zıt-emk gerilim değerleri verilmiştir. Rotor çapı ile indüklenen gerilim artmaktadır, ancak 60 mm'den sonra ciddi bir değişim görülmemiştir. Her faza ait rotor diski 120° elektriksel açı kaydırılarak sıralandığından, dengeli 3 faz gerilimler indüklenmektedir (Şekil 5b).



Şekil 4. Enine akılı disk makinenin tek faz 1/6 simetrisinde a) manyetik akı yoğunluğu dağılımı ve b) mesh ağı



Şekil 5. a) İç yarıçapa göre bir zıt-emk gerilim dalga şekilleri, b) 55 mm iç yarıçapta 3 faz gerilimleri

Rotor iç çapına göre; indüklenen gerilimlerin harmonik incelemesi için, toplam harmonik bozulmalarına (THD) bakılmıştır. Böylece zıt emk'ların 1. harmonikten ne kadar uzaklaştığı görülebilir. Bunun için eşitlik 7'deki denklem kullanılır. Buna göre rotor iç yarıçapına göre THD değerleri Tablo 2'deki gibidir. IEEE 519-2014' e göre, 1.0 kV'dan düşük gerilimlerde harmonik bozulum THD(%) = 8.0'in altında olmalıdır.

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1}$$

7

Tablo 2. İç yarıçapa göre 1 faz zıt emk THD'leri

İç Yarıçap (mm)	1. Harmonik (Volt)	%THD
50	28.58	2.96
55	30.22	4.15
60	33.1	3.62
65	33.1	2.81

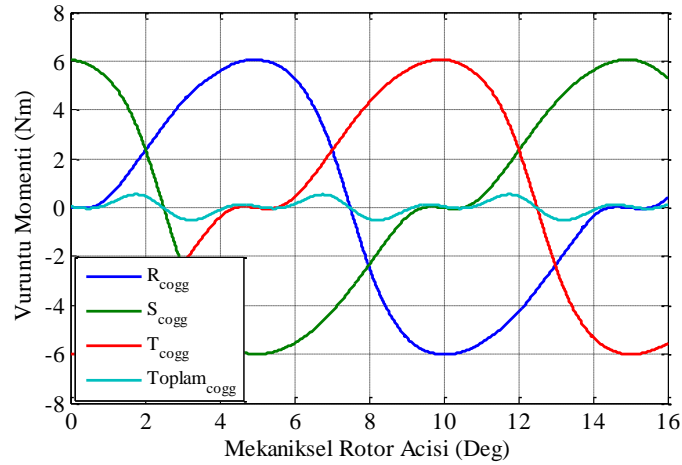
4. ENİNE AKILI MAKİNEDE VURUNTU MOMENTİ (COGGING TORQUE OF THE TFM)

Vuruntu momenti, sürekli mıknatıslı makinelerde rotor üzerindeki sabit mıknatıslar ile stator dişleri arasındaki etkileşimden kaynaklanan bir kuvvettir. Sürekli mıknatıslı bir makinenin vuruntu momenti eşitlik 8'deki gibi hesaplanır. Burada p kutup çifti sayısıdır. Stator ve rotor çekirdeğinin sonsuz geçirgenlikte olduğunu kabul edersek, toplam enerji W eşitlik 9'daki gibi yazılabilir.

$$T_{cog} = -p \frac{dW}{d\theta} \quad (8)$$

$$W = \frac{1}{2\mu_0} \int_{V_{air}} B_{air}^2 dV + \frac{1}{2\mu_{pm}} \int_{V_{pm}} B_{pm}^2 dV \quad (9)$$

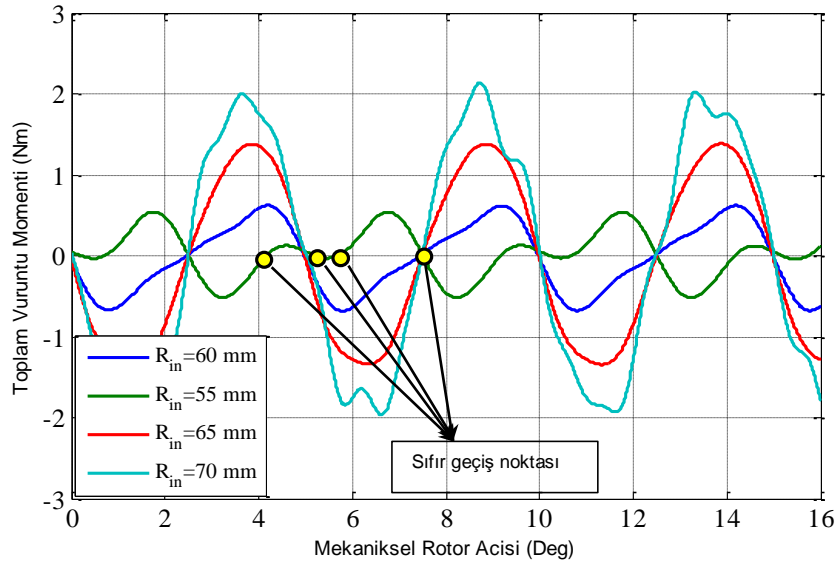
EAM'lerin en büyük dezavantajlarından biri vuruntu momentinin yüksek olmasıdır. EAM'lerde vuruntu momentini azaltmak için 3 fazlı disk modeli uygulanmaktadır [20]. Böylece tek faz başına yüksek olan vuruntu momenti toplamda azaltılır. Şekil 6'da rotor içyarıçapı 55 mm olan disk EAM modelinde, sonlu elemanlar analizi ile elde edilen faz başına ve toplam vuruntu momentleri görülmektedir. Faz başına 6 Nm tepe değerli vuruntu momentleri gözlenirken, 3 faza geçildiğinde toplam vuruntu momentini 0,5 Nm'lere düşmektedir.



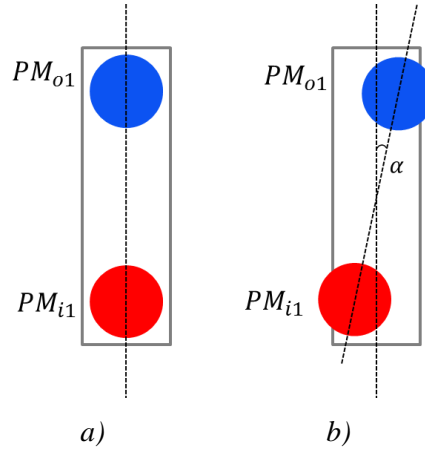
Şekil 6. 55 mm rotor iç çaplı disk tipi EAM'de faz başına ve toplam vuruntu momentinin rotor açısı ile değişimi

Bu çalışmada, rotor iç çapının vuruntu momentine etkisi de incelenmiştir. Rotor iç çapının artması, faz sargılarında indüklenen gerilimin dalga formunu sinüse yaklaştırmaktadır, ancak rotor iç çapını arttırmak vuruntu momentini de arttırmaktadır (Şekil 7). En düşük vuruntu momentini 55 mm rotor yarıçapında görülmüştür. Bu ölçülerde; rotor açısına göre bir periyot boyunca vuruntu momentini, sıfır geçiş noktasından daha çok geçmektedir. Dolayısıyla toplam vuruntu momentini etkisinin azaldığı söylenebilir.

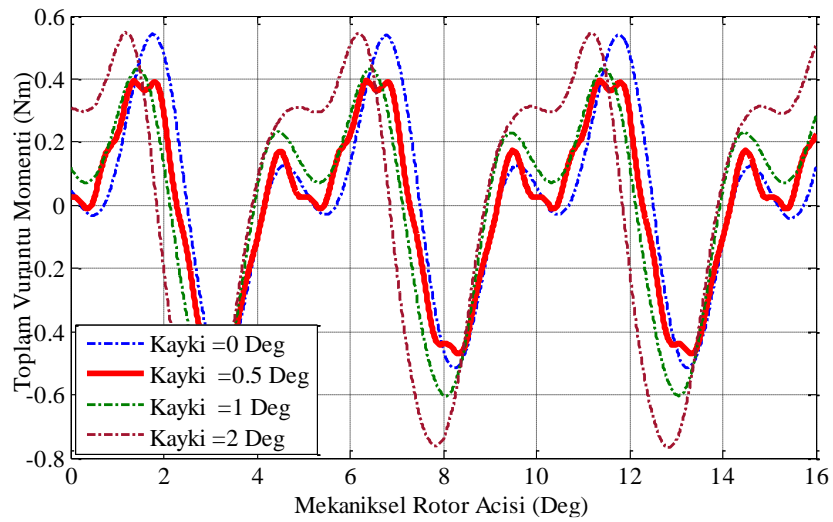
Enine akıllı makinelerde vuruntu momentini azaltmak için, nüvelere küçük oluklar açmak [21], mıknatıs veya kutup uçlarının eğimli olması [22], stator ve rotor disklerinde kaykır yapılması [23, 24], stator ve rotorda simetrik olmayan kutupların kullanılması gibi yöntemler kullanılabilir. Bu çalışmada üretim kolaylığı da dikkate alınarak, Şekil 8'de görüldüğü gibi, mıknatıs kaykırısının etkisi incelenmiştir. Farklı α açıları için; rotor konumuna göre toplam vuruntu momentinin dalga şekilleri, Şekil 9'da görülmektedir. Mıknatıs kaykırısı $0,5^\circ$ olduğunda vuruntu momentini azalırken, α büyüdükçe vuruntu momentini tekrar artış göstermektedir. Buna göre; en düşük vuruntu momentini $\alpha = 0,5^\circ$ 'de görülmüştür.



Şekil 7. Toplam vurutu momentinin rotor iç çapı ile değişimi



Şekil 8. Vuruntu momentini azaltmak için mıknatısların kaydırılması a) kayk=0 b) kayk=α



Şekil 9. Farklı Mıknatıs kaykalarında toplam vurutu momentinin değişimi

5. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada, 3 fazlı yeni bir enine akıllı disk generatör önerilmiştir. Rüzgâr türbinleri gibi düşük hız yüksek moment uygulamaları için önerilen generatörün, açık devre elektromanyetik analizleri gerçekleştirilmiştir. Faz başına zıt-emk dalga şekillerine ve vuruğu momentine rotor çapının etkisi gözlenmiştir. Ayrıca enine akıllı makinelerin en önemli sakıncalarından olan vuruğu momenti de faz başına ve 3 faz toplamı olarak analiz edilmiştir. Vuruğu momentini azaltmak için mıknatıs kaykık yöntemi kullanılmıştır. Bir faz başına 6 Nm olan vuruğu momenti, optimizasyon sonucunda toplam 0,38 Nm' ye düşürülmüştür. Bu sonuçlara göre, önerilen disk tipi EAM, rüzgâr türbinleri ve elektrikli araçlar gibi düşük hız yüksek moment uygulamalarında kullanılabilir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)



Bu çalışma, Düzce Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından 2018.06.03.897 proje numarası ile desteklenmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Weh, H., May, H., Achievable Force Densities for Permanent Magnet Excited Machines in New Configurations, Proceedings of the International Conference on Electrical Machines, vol. 3, pp. 1107-1111, Sept., 1986.
- [2] E. Aydin, J. H. Kim, E. Yildiriz, M. T. Aydemir and B. Sarlioglu, "A hybrid-excited axial transverse flux permanent magnet generator," 2016 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Milwaukee, WI, 2016, pp. 1-6.
- [3] Chen, A., Nilssen, R., Nysveen, A., Performance Comparisons Among Radial-Flux, Multistage Axial-Flux, and Three-Phase Transverse-Flux PM Machines for Downhole Applications, IEEE Transactions on Industry Applications, 46(2), 779-789, 2010.
- [4] Harris, M.R., Pajooman, G. H., Abu Sharkh, S.M., The Problem of Power Factor In VRPM (Transverse-Flux) Machines, 1997 Eighth International Conference on Electrical Machines and Drives (Conf. Publ. No. 444), pp. 386-390, Sept., 1997.
- [5] Zheng, P., Zhao, Q., Bai, J., Yu, B., Song, Z., Shang, J., Analysis and Design of A Transverse-Flux Dual Rotor Machine for Power-Split Hybrid Electric Vehicle Applications, Energies, 6, 6548-6568, 2013.
- [6] Yu, Z., Jianyun, C., Power Factor Analysis of Transverse Flux Permanent Machines, 2005 International Conference on Electrical Machines and Systems.
- [7] Zhao, F., Lipo, T.A. , Fellow, L., Kwon, B.I., A Novel Dual-Stator Axial-Flux Spoke-Type Permanent Magnet Vernier Machine For Direct-Drive Applications, IEEE Transactions on Magnetics, 50(11), 1-4, 2014.
- [8] Hosseini, S., Moghani, J. S., Ershad, N. F., Jensen, B. B., Design, Prototyping, and Analysis of A Novel Modular Permanent-Magnet Transverse Flux Disk Generator, in IEEE Transactions on Magnetics, 47(4), 772-780, 2011.
- [9] Mignot, R.B., Dubas, F., Espanet, C., Cuchet, C., Chamagne, D., Original Design of Axial Flux PM Motor and Modeling of The Magnetic Leakage Using A Magnetic Equivalent Circuit, 2012 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, 138-141, Oct., 2012.
- [10] Yan, J., Li, Q., Lin, H., Feng, Y., Electromagnetic Design and Analysis of a Novel Flux-Concentrated Transverse Flux Permanent Magnet Disk Generator, 17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 453-457, Oct., 2014.

- [11] Peng, G., Wei, J., Shi, Y., Shao, Z., Jian, L., A Novel Transverse Flux Permanent Magnet Disk Wind Power Generator with H-Shaped Stator Cores, *Energies*, 11(4), 1-19, 2018.
- [12] Noroozi, M.A., Moghani, J.S., Yazdanpanah, R., Passive-rotor Disk-shaped Transverse-flux Permanent-magnet Generator for Small Wind Turbine Application, *The 6th International Power Electronics Drive Systems and Technologies Conference (PEDSTC2015)*, 25-28, Feb., 2015.
- [13] Jia, Z., Lin, H., Fang, S., Huang, Y., Cogging Torque Optimization of Novel Transverse Flux Permanent Magnet Generator With Double C-Hoop Stator, *IEEE Transactions on Magnetics*, 51(11), 1-4, 2015.
- [14] Kurt E., Arslan S., Demirtaş M., Cogging Torque Exploration of Radially and Angularly Directed Fluxes in a New PM Generator with the Multiple Stators, In: *Proceedings of the 7th. int. conf. & Exh. ecological vehicles and renewable energies – EVER'12. Monaco; 2012.*
- [15] Kou, B., Yang, X., Luo, J., Zhou, Y., Modeling and Analysis of a Transverse-Flux Flux-Reversal Motor, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 31(3), 1121-1131, 2016.
- [16] Yan, J., Feng, Y., Jin, P., Cogging Torque Optimization of Flux Concentrated Transverse Flux PM Disk Generator by Skewing PM Poles, *21st International Conference on the Computation of Electromagnetic Fields, (Compumag)*, 1-2, June, 2017.
- [17] Uygun, D., Çetinceviz, Y., Yüzey Yerleştirmeli Kalıcı Mıknatıslı Senkron Generatörlerin Tutma Torkunun Azaltılması İçin Stator Yapılandırması. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 6 (3), 605-620, 2018.
- [18] Husain, T., Sozer, Y., Husain, I., Muljadi, E., Design of A Modular E-Core Flux Concentrating Axial Flux Machine, *2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 5203-5210, Sept., 2015.
- [19] Hosseini, S., Moghani, J. S., Ershad, N. F., Jensen, B. B., Design, Prototyping, and Analysis of a Novel Modular Permanent-Magnet Transverse Flux Disk Generator, in *IEEE Transactions on Magnetics*, 47(4), 772-780, 2011.
- [20] Washington, J. G., Atkinson, G. J., Baker, N. J., Reduction of Cogging Torque and EMF Harmonics in Modulated Pole Machines, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 31(2), 759-768, 2016.
- [21] Srisiriwanna, T., Konghirun, M., A study of Cogging Torque Reduction Methods in Brushless DC Motor, *9th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology*, 1-4, May., 2012.
- [22] Wang, Y., Shen, J., Fang, Z., Fei, W., Reduction of Cogging Torque in Permanent Magnet Flux-Switching Machines, *Journal of Electromagnetic Analysis and Applications*, 1(1), 11-14, 2009.
- [23] Aydin, M., Magnet Skew in Cogging Torque Minimization of Axial Gap Permanent Magnet Motors, *18th International Conference on Electrical Machines*, 1-6, Sept., 2008.
- [24] Ueda, Y., Takahashi, H., Ogawa, A., Akiba T., Yoshida, M., Cogging-Torque Reduction of Transverse-Flux Motor by Skewing Stator Poles, in *IEEE Transactions on Magnetics*, 52(7), 1-4, 2016.

Aiming of Optimum Energy Efficiency with Rapidly-Exploring Random Tree and Artificial Bee Colony Path Planning Algorithm for Autonomous Robots

 Yunis TORUN^{1,*} , Züleyha ERGÜL², Ahmet AKSÖZ³ 
^{1,2}Sivas Cumhuriyet University, Electrical and Electronics Engineering Department, 58340, Merkez/SIVAS

³Sivas Cumhuriyet University, Department of Energy Science and Technology, Merkez/SIVAS

Graphical/Tabular Abstract

It is of high importance for autonomous robots that no collision occurs during operation and the target position is reached by using the softest and shortest route. While using the defined route, maximum efficiency is achieved by minimizing energy consumption. Thus, route calculation and optimization are one of the most important criteria's when it comes to continuous improvement.

Article Info:

Research article

Received: 20/08/2019

Revision: 29/09/2019

Accepted: 29/10/2019

Highlights

- ABC algorithm.
- Optimum path planning.
- Matlab-Simulink

Keywords

Rapidly-Exploring
Random Tree,
Artificial Bee Colony
algorithm,
Optimum path planning,
Energy efficiency,
Autonomous robots

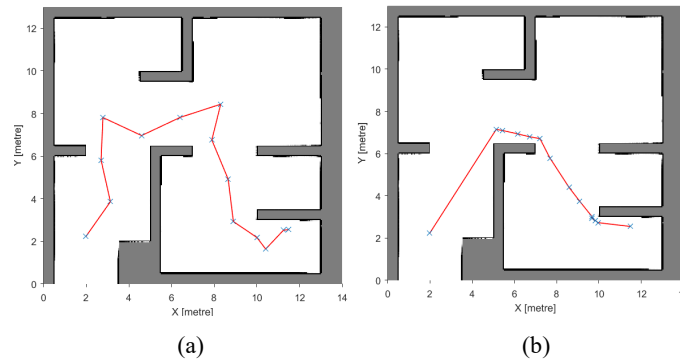


Figure A a. Start point (B) and final point (S) with RRT
b. Start point (B) and final point (S) with hybrid RRT-ABC

Purpose: In this study a hybrid of heuristic and classic route planning approaches have been used to combine their advantages while minimizing the disadvantages of each method.

Theory and Methods: Initially the optimum route for a defined starting and destination point was determined by using Rapidly-exploring Random Tree-RRT method of the classic approach and artificial bee colony-ABC method of the heuristic approach separately. Afterwards a hybrid approach was used and compared by using the Robotic System Toolbox of MATLAB. The results of the study show that energy consumption of a two wheeled mobile robot is higher when using either pure heuristic approach in comparison to a RRT-ABC hybrid approach.

Results: Since the RRT algorithm operates much faster than the hybrid algorithm and the hybrid algorithm follows a shorter path than the RRT, the spent energy values are very close to each other. As a result of these two parameters balancing each other, it was observed that the energy consumed in the hybrid algorithm approached the energy consumed in the RRT algorithm compared to the energy consumed in the ABC algorithm. It was observed that the RRT-ABC hybrid algorithm consumed less energy than ABC alone, taking advantage of the applicability of real time problems due to ABC being an heuristic algorithm in Section 3.

Conclusion: The RRT algorithm tries to find the shortest path, avoiding obstacles as it moves from the starting position to the target position in a previously discovered environment. But since it is a classical method, the path it finds is not optimal. Since ABC is a heuristic algorithm, it aims to find the universal optimum value. The RRT-ABC algorithm has an optimization process for road length, road smoothness and road safety. The success of the RRT-ABC algorithm stems from the advantage that the RRT calculation time is low and the universal minimum can be found by the ABC algorithm. Our proposed algorithm is faster, smoother, and safer than the ABC algorithm, as seen in comparisons in experimental studies.



Optimum Enerji Verimliliğini Hedefleyen Rastgele Ağaçlar ve Yapay Arı Kolonisi Yöntemi ile Otonom Robotlarda Yol Planlama Algoritması

Yunis TORUN^{1,*}, Züleyha ERGÜL², Ahmet AKSÖZ³

^{1,2}Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 58340, Merkez/SIVAS

³ Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Enerji Bilimi ve Teknolojisi Bölümü, Merkez/SIVAS

Öz

Operatörsüz hareket eden robotların (otonom robotlar) hareket sırasında engellere çarpmadan, en kısa yol ve en yumuşak yolu seçerek hedef konumuna ulaşması büyük önem taşımaktadır. Bu çalışma, yol planlama eyleminde sezgisel ve klasik yöntemlerin avantajlarını birleştirmek, dezavantajlarını ise minimize etmek için, iki yöntemin melez kullanımı ile gerçekleştirildi. Öncesinde klasik yöntemlerden, Rastgele Ağaçlar yöntemi (Rapidly-exploring Random Tree-RRT) ve sezgisel yöntemlerden de Yapay Arı Kolonisi yöntemi (Artificial bee colony-ABC) ayrı ayrı harita üzerinde değerlendirildi. Akabinde bu iki yöntemin melez kullanılmasıyla oluşturulan yaklaşım değerlendirildi. Söz konusu yapılan bu melez değerlendirme, önceden keşfedilmiş, başlangıç ve hedef noktası belli bir haritada yapıldı. Yol kriterlerini optimize ederek, MATLAB Robotik Sistem Araç Kutusu (Robotic System Toolbox) üzerinden benzetimi gerçekleştirildi. Sunulan melez algoritmada, takip edilen yol hesaplanırken, enerji verimliliği ile birlikte yol güvenliği de dikkate alındı. İki tekerli mobil robotun enerji tüketimini RRT, ABC ve melez RRT-ABC yöntemlerinin kullanılması ile elde edilen yollarda hesaplandı ve karşılaştırıldı. Yapılan karşılaştırmalar sonucunda melez algoritmanın daha verimli çalıştığı gözlemlendi.

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 20/08/2019
Düzeltilme: 29/09/2019
Kabul: 29/10/2019

Anahtar Kelimeler

Rastgele Ağaçlar yöntemi,
Yapay Arı Kolonisi algoritması,
Optimum rota planlama,
Enerji verimliliği,
Otonom robot.

Keywords

Rapidly-Exploring
Random Tree,
Artificial Bee Colony
algorithm,
Optimum path planning,
Energy efficiency,
Autonomous robots

Aiming of Optimum Energy Efficiency with Rapidly-Exploring Random Tree and Artificial Bee Colony Path Planning Algorithm for Autonomous Robots

Abstract

It is of high importance for autonomous robots that no collision occurs during operation and the target position is reached by using the softest and shortest route. While using the defined route, maximum efficiency is achieved by minimizing energy consumption. Thus, route calculation and optimization are one of the most important criteria's when it comes to continuous improvement. In this study a hybrid of heuristic and classic route planning approaches have been used to combine their advantages while minimizing the disadvantages of each method. Initially the optimum route for a defined starting and destination point was determined by using Rapidly-exploring Random Tree-RRT method of the classic approach and artificial bee colony-ABC method of the heuristic approach separately. Afterwards a hybrid approach was used and compared by using the Robotic System Toolbox of MATLAB. The results of the study show that energy consumption of a two wheeled mobile robot is higher when using either pure heuristic approach in comparison to a RRT-ABC hybrid approach.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Gelişen teknolojiyle insansız hava/yer araçlarının farklı uygulama alanları, düşük maliyet, yüksek manevra yetenekleri, can güvenliği gibi birçok avantajlarından dolayı askeri veya sivil alanlarda tercih edilmektedir [1]. Askeri alanda kullanılan kâşif dronlar ve otonom hareket edebilen robotlar örnek olarak sayılabilir [1].

Operatörsüz hareket eden otonom araçlar, temel anlamda insan müdahalesi olmadan bir konumdan başka bir konuma kendi karar verip hareket edebilen araçlardır. Bu işlemi yaparken mümkün olduğunca minimum enerji harcaması verimlilik açısından en önemli konulardandır. İzlenecek rota robot tarafından belirlenirken yapılan hesapta yol planlama ve hareket kontrolü aşamalarını gerçekleştirilmesi gerekmektedir[2]. Yol

planlama aşamasında, başlangıç ve bitiş noktaları arasında hesaplanan rotalardan birinin seçimi yapılır. Ardından hareket kontrolü aşamasında ise robot belirlenen rotanın planlandığı şekilde harekete geçmesi ve güvenli bir şekilde hedef konumuna ulaşması istenir.

Yol planlama aşamasında genel olarak tüm yaklaşımları kapsayan global ve lokal olmak üzere iki temel teknik vardır[3]. Çevrimdışı olarak da adlandırılabilen global yaklaşıma göre ortam önceden keşfedilmiş veya harita önceden bellidir. Verilerini ortamdan bilgi almayarak güncellemediği için dinamik engellerden kaçınmaz. Bulunan yol buna bağlı olarak düşük çözünürlüklüdür. Çevrimiçi yani lokal yaklaşımda ortam hakkında önceden bilgi sahibi olmasa dahi etrafındaki algılayıcılar sayesinde robot çevreyi algılayarak dinamik ve statik engelleri fark edebilir. Robot bu yaklaşım sayesinde, yüksek çözünürlüklü bir yol izleyebilir ama hedefi uzak mesafelerde ve/veya karmaşık ortamlarda verimsiz çalışabilir.

Yol hesaplama algoritmaları klasik ve sezgisel olmak üzere iki ana kategoride sınıflandırılır [3,4]. Klasik yöntemler, lokal optimum çözümü bulurlar ve dinamik ortamlarda doğru çalışmayabilirler [4]. Bu dezavantajlara rağmen klasik yöntemler hızlı çalışma zamanına sahiptirler [4]. Sezgisel yaklaşımlar ise dinamik engellerden kaçınabilir ve global optimum çözümü hesaplayabilirler [4]. Literatürde iki yöntemin dezavantajlarını minimize etmek ve avantajlarını güçlendirmek için melez kullanımı önerilmiştir [4].

Klasik yöntemler; Hücre Ayrışımı yöntemi (Cell Decomposition-CD) [4,5], Potansiyel Alan yöntemi (Potential Field-PFM) [6,7,8], Alt Hedef Ağı yöntemi (Subgoal Method-SG) [9,10,11], Örnekleme Tabanlı yöntemler (Sampling-based methods-SBP) [12] kendi arasında Rastgele Ağaçlar yöntemi (Rapidly Exploring Random Trees-RRT) ve Olasılıksal Yol Haritası yöntemi (Probabilistic Road Map-PRM) olarak karşımıza çıkar. Sezgisel yöntemlerden, birden fazla değişken komşuluk araştırması [13], Yapay Sinir Ağları (Neural Network-NN) yöntemi [14,15,16], Bulanık Mantık (Fuzzy Logic-FL) [17,18], Karar Destek Makinaları [19], Doğadan Esinlenen algoritmalar; Genetik algoritması (Genetic Algorithms-GA) [20,21,22,23], Yarasa algoritması (Bat algorithm) [24], Parçacık Sürüsü optimizasyonu (Particle Swarm Optimization-PSO) [25,26], Karınca Kolonisi optimizasyonu (Ant Colony Optimization-ACO) [27], Yapay Arı Kolonisi Algoritması (Artificial Bee Colony-ABC) [28] ve bunların melez algoritma çalışmaları yapılmıştır.

Otonom araçların, hesapladığı optimum yolu takip ederken minimum enerji tüketmesi istenir. Harcanan enerji; belirlenen yolun uzunluğuna, zeminin yapısına ve dönüş açılarına bağlı olduğu gibi aracın ağırlığına, atalet momentine, aracın yarıçapına, tekerlek yarıçapına ve yerçekimine bağlı olduğu da gözlemlenmiştir. Literatürde iki tekerli bir otonom robotun harcadığı enerji matematiksel olarak tek bir yolla hesaplanmıştır[28]. Çalışmamızda enerji hesaplarken bu modeli kullanarak karşılaştırma yapılmıştır.

Bu çalışmada klasik yöntemlerden Rastgele Ağaçlar yöntemi (RRT) ile sezgisel yöntemlerden Yapay Arı Kolonisi yöntemi (ABC) kullanılarak melez bir yol planlama algoritması geliştirildi ve bulunan rotayı iki tekerli robotun takip etmesi halinde harcayacağı enerji hesaplandı.

RRT algoritmasının hızlı olması ve ABC algoritmasının optimuma daha yakın sonuçlar vermesi, bu iki yöntemin ayrı ayrı kullanılmasına göre melez kullanılmış olması daha umut verici bir yaklaşımdır. Literatürde RRT-Evolutionary Algorithm (RRT-Evrimsel algoritma) [29], PRM-GA [30], ACO-PRM [31], Potential Field-ACO [32], PSO-PRM [33] gibi melez kullanılan algoritmalar dikkat çekmiştir. Rastgele Ağaçlar yöntemi ile Yapay Arı Kolonisi yöntemi melez kullanımı literatürde ilk defa bu çalışmayla ortaya atıldı.

İlerleyen bölümde çalışmada kullanılan yöntemler açıklanmış ve ardından uygulanan deneysel çalışma sunulup karşılaştırmalar yapılmıştır. Üçüncü bölümde ise sonuçlar ve ilerletilebilecek çalışmalar sunulmuştur.

2. MATERYAL VE METOT (MATERIAL AND METHOD)

Otonom robotlarda optimum rota belirlenirken sezgisel ve/veya klasik yöntemler kullanılmaktadır. Bu çalışmada sezgisel algoritmalar ABC, klasik algoritmalar RRT kullanıldı. Ardından önerilen algoritma iki tekerlekli bir robotun hareket ederken harcadığı enerji formülü ile harcanan enerji hesaplandı. Benzetim çalışmaları MATLAB üzerinden gerçekleştirildi.

2.1. Rastgele Ağaçlar Yöntemi (Rapidly-exploring Random Tree-RRT)

RRT başlangıç noktasından hedef noktasına ilerlerken çevresinde rastgele noktalar seçerek ve bu noktalara sürekli dallanmalar gerçekleştirerek rastgele yollar belirler. Bu işleme başlangıç noktasından başlar ve çevresinde belirlenen limit değerinde rastgele noktalar atar. Bir sonraki nokta seçimlerini en yakın olan düğümü başlangıç noktası düşünerek yine rastgele yani önceki düğümleri dikkate almadan herhangi bir hesap yapmadan belirler. Ancak yeni noktalardan önceki belirlenen noktalara en yakın olanlar birbirine bağlanır. Düğümler birbirine bağlanırken engele çarpıyorsa o dallanmadan vaz geçilir. Böylece işlemler bulunan en yakın nokta hedef noktası olana kadar sürekli tekrarlanır. Bağlantılardan belirlenen harita içerisinde çeşitli dallanmalar gerçekleşerek yollar meydana getirir. Elde edilen yollardan başlangıç-hedef noktası arası en kısa olan seçilir. RRT yol planlamada ilk kez LaValle ve arkadaşları tarafından, hem sabit engellerden hem de çok boyutlu alanları hızlıca keşfetmek için verimli bir veri yapısı ve örnekleme şeması olarak tanıtılmıştır [34].

RRT' deki bir problem, rastgele tekniği kullanarak çalışma alanında birçok dal ile bir yol üretmesidir. Kuffner ve arkadaşları daha hızlı, daha optimum ve çok fazla dallanma olmadan bir çözüm elde etmek için RRT algoritmasını hem başlangıç hem de hedef noktasından başlatma fikri sunmuşlardır [35]. İyileştirilmiş RRT de başlangıç ve hedef den gelen rastgele dallanmaların oluşturduğu noktalar arası mesafe belirli bir sayının altında ise noktalar birleştirilir ve yol arama işlemi durdurulacak şekilde iyileştirilmiştir. Sonuç olarak daha az dallanma gerçekleştirerek yol planlama işlemi daha hızlı gerçekleştirilmiştir.

Ardiyanto ve arkadaşları dinamik ve karmaşık ortamlarda bir mobil robot için yeni bir yol planlama yaklaşımı sunmuştur [36]. Sezgisel Varış Zamanlı Rastgele Ağaçlar yöntemi (Heuristic Arrival Time Field-biased-HeAT- Random Tree) olarak adlandırılmış yöntem optimum yolu, güvenliği ve gerçek zamanlı uygulanabilirliği sezgisel varış zamanı alanı ile rastgele ağaçlar yönteminin birleştirilmiş halini sunmaktadır. RRT rastgele noktalar seçmek yerine varış zamanı alanından noktalar seçer ve böylece hedef noktasına doğru daha kararlı bir şekilde yönelir. Varış zamanı alanları açık renkli olanlar hedefe daha yakın olanlar iken koyu renkliler daha uzak olan bölgelerdir. Dolayısıyla seçimler açık renkli alanlardan yapılır ve RRT' nin rastgele seçimlerinin çok fazla yol oluşturmasının önüne geçilmiş olunur. Klasik RRT yöntemi oldukça hızlı bir hareket planı üretebilmesi açısından dikkat çekmektedir. Ancak tam olarak optimum yolu - en yumuşak geçişli veya en verimli yol- bulamaması ve gerçek zamanlı ortamlarda dinamik engellerden kaçamaması açısından tek başına kullanışlı değildir. Martin ve arkadaşları dinamik ortamlarda daha optimum sonuçlar elde etmek için RRT yöntemi sezgisel yöntemlerle melez kullanımını sunmuştur [29]. Çalışmada evrimsel algoritma ile RRT aynı anda karar verecek şekilde melez bir algoritma geliştirilmiş ve elde edilen sonuçlar oldukça verimli olup RRT'nin sezgisel algoritmalar ile melez kullanımının gerçek zamanlı kullanımda daha verimli sonuçlar elde edilebileceği görülmüştür.

2.2. Yapay Arı Kolonisi Algoritması (Artificial bee colony-ABC)

Sezgisel algoritmalarından en popüler olanlar doğanın düzenini taklit eden algoritmalarlardır. Bu algoritmalar doğadaki popülasyonların davranış biçimlerinden faydalanılarak geliştirilir. Bunlardan biri de arıların polen bulma eylemini taklit eden ABC algoritmasıdır. ABC, 2006 yılında Karaboğa tarafından sunulan bir arı sürüsü zekâsı algoritmasıdır [37]. Araştırmada arıların yiyecek kaynağı arama işlemlerinin kusursuz bir şekilde gerçekleştirdiği ve arılar arasındaki işbölümünün karışıklığa uğramadan belirlendiği saptanmıştır. Böylece kovandaki işlerde ne bir aksama nede bir dengesizlik meydana gelir. Bu tespitler sunulan algoritmanın hem gerçek zamanlı hem de optimum sonuçlar verebileceğine işaret etmektedir. Karaboğa arıların bu davranış biçiminin matematiksel modellemesini gerçekleştirerek algoritmasını geliştirmiştir. Bir kovandaki arı sürüsünde üç çeşit görevde arı bulunur. Bunlar kaşif arılar, işçi arılar ve gözcü arılar olarak gruplandırılırlar. Kaşif arılar kovandan çıkıp etraftaki en uygun kaynağı, belli kriterlere bağlı bir olasılık fonksiyonu ile belirlerler. Kaşif arılar kaynağı seçip nektar almaya başladığı anda işçi arılara döner. İşçi arılar nektarı alıp kovana döndüklerinde herbirini ayrı bir gözcü arı karşılar. Gözcü arılar işçi arıların danslarını takip ederek kaynaklara ulaşırlar. Kaynaklara ulaşan gözcü arılar nektar toplayıp kovana dönerler. Kaynaklardaki nektar bitene kadar bu iş bölümü devam eder. Ardından işçi arılar tekrardan kaşif arılara dönüşerek yeni kaynaklar aramaya devam ederler [37].

Algoritmanın çalışma mantığı aşağıdaki gibidir [38];

Kaynak sayısı kadar başlangıç popülasyonu belirle $x_{i,j}$

while (*i* < maksimum iterasyon sayısı)

{ İşçi arılar için yeni $v_{i,j}$ çözümlerini $x_{i,j}$ komşuluğunda üret

$$v_{i,j} = x_{i,j} + \Phi_{ij}(x_{i,j} - x_{k,j})$$

x_i ve v_i arasında yeni ve daha iyiye eğilimli keşif operasyonunu kullan ve yeni kaynaklar bul,

for (bulunan kaynaklar için)

$$\{ \text{Olasıksal değerini hesapla } P_i = \frac{fit_i}{\sum_{i=1}^{SN} fit_i},$$

Uygunluk değerini hesaplamak için,

$$fit_i = \left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{1+|f_i|} \text{ if } f_i \geq 0 \\ 1 + |(f_i)| \text{ if } f_i < 0 \end{array} \right\}$$

end for

Yeni çözümler üret $v_{i,j}$

Yeni ve daha iyiye eğilimli keşif operasyonunu kullan

if (Yeni bulunan $v_{i,j}$ daha iyi ise)

{ Eski $v_{i,j}$ kaynağını terk et

else (Yeni bulunan $v_{i,j}$ daha kötü ise)

Değişiklik yapma}

end if

if (Terk edilen kaynak varsa)

{Terk edilen kaynağı tanımla ve yeni rastgele belirlenen $x_{i,j}$ kaynağı ile değiştir

else (Terk edilen kaynak yoksa)

İzci arı tarafından $x_{ij} = \min_j + \text{rand}(0,1) * (\max_j - \min_j)$ denklemini kullanarak yeni kaynak bul,

Bulunan en iyi çözümü hafızaya kaydet }

end if }

end while (Maximum çevrim sayısı bitene kadar devam et)

Literatürde ABC algoritması bazı durumlarda Genetik Algoritma (GA), Parçacık Sürü Algoritması (PSO), Diferansiyel Gelişim algoritması (DE) ve Parçacık Sürü Evrimsel Algoritma (PS-EA) gibi diğer doğadan ilham alan algoritmalarından daha iyi çalıştığı gözlemlenmiştir[28,39]. ABC algoritması gerçek zamanlı ve karmaşık ortamlarda optimum sonuca ulaşabilir. Fakat yüksek hesaplama zamanına sahiptirler. Bunun önüne geçebilmek için bu çalışmada, ABC-RRT melez algoritması fikri iki yaklaşımın olumlu yanlarını birleştirmek amaçlı sunulmuştur.

2.3. Melez RRT ve ABC Algoritması (Heuristic RRT and ABC Algorithm)

Yapılan çalışmada yol planlama algoritmasını geliştirirken ABC algoritmasının gerçek zamanlı uygulanabilirliği ile RRT algoritmasının hızı birleştirilerek yeni melez bir ABC-RRT algoritması geliştirildi. Algoritmanın çalışma mantığına göre önceden belirlenmiş bir haritaya ve belirlenmiş başlangıç-sonuç noktalarına ihtiyaç duyar. Bu uzayda öncelikle RRT algoritması çalıştırılıp bir sonuca ulaştırılır.

Ardından belirlenen bu rota ABC algoritmasında yol uzunluğunu, güvenliğini, yumuşaklığını (akıcılığını) dikkate alarak yeni bir çözüm üretir. RRT algoritmasının belirlediği rota sayesinde daralan uzay ABC algoritmasının daha hızlı çalışmasına olanak sağlıyor.

Elde edilen sonuç yol uzunluğu, güvenliği ve yumuşaklık (akıcılık) değerlerini içeren bir maliyet fonksiyonu sayesinde optimuma yakın enerji tüketimine olanak sağlar.

$$\text{maliyet fonksiyonu} = W_p * Pl + W_a * Sm + W_s * Sa \quad 1$$

Maliyet fonksiyonu, sadece en kısa yolu hesaplamaya odaklanmaz aynı zamanda enerji tüketimini minimize etmeyi hedefler. Bunu en uygun açıyla dönmeyi ve engellerden kaçınırken optimum mesafeyi korumayı da hesaba katarak gerçekleştirir.

Denklem (1)'de Pl değişkeni metre cinsinden minimum yol uzunluğunu ifade edilirken W_p sabiti ile de kontrol edilmektedir. Yolun her bir düğümüne bağlı kenarlar arasındaki açıların ortalamasını Sm ile belirtirken bu açının akıcılık şiddeti W_a ile ayarlandı. Buradaki amaç robotun keskin virajları daha yumuşak geçişlerle tamamlamasını sağlamak, böylece enerji verimliliğini arttırmak ve aynı zamanda ömrü uzatabilmektir. Robotların engellerden kaçınırken en uygun mesafede kalabilmesi için aralarındaki en güvenli minimum mesafede kalması gerekmektedir. Bu değer Sa ile formüle dahil edildi. W_s robot boyutuna göre belirlenen, engeller ile robotun arasındaki minimum mesafenin ayarlanmasında kullanıldı. Maliyet fonksiyonunda tüm bu kısıtlar dikkate alınarak fonksiyon en küçük değeri araması sağlanır. Bu da optimale yani en az enerji harcayan en verimli yola yaklaştığı anlamına gelir.

İlk olarak RRT aşağıdaki adımları izler;

```

Haritayı çağır
Başlangıç ve bitiş noktalarını belirle
while (i < düğüm sayısı veya hedefe ulaşına kadar)
  { Harita üzerinden rastgele  $q_{rand}$  düğümlerini belirle
  for (Başlangıç noktasına en yakın  $q_{near}$  seç)
    { Başlangıç noktasından  $q_{near}$  düğümüne dal oluştur,
     $q_{near}$  düğümünden  $q_{rand}$  düğümü yönüne yeni dallanmalar için yönlendir
    if (Düğüm çok uzaksa)
      { Enterpolasyonla düğümü yakınlaştır  $q_{new}$  düğümüne ulaş
      Engele çarpmadığını kontrol et,
       $q_{near}$  düğümü ile  $q_{new}$  düğümü arası  $C_{min}$  maliyet fonksiyonunu hesapla,
      Düğüm listesine  $q_{new}$  düğümünü ekle }
    end if }
  end for }
end while
Belirlenen minimum yolu belirleyen tüm düğümlerinin x ve y değerlerini hafızaya at

```

RRT ile gerçekleştirilen yolun takip ettiği düğümler $path_{x,y} = \sum_{i=2}^{n-1} N_i$ $\{i = 1,2,3,\dots,n\}$ matris şeklinde hafızaya atılıp ABC algoritması tarafından çağırılır. Formülde n belirlenen yolu çizen düğüm sayısıdır.

Belirlenen probleme uyarladığımız ABC algoritması aşağıdaki adımları izler;

```

Repeat:
for (Engel yoksa ve  $k < M$  iken)
  { Kaynak oluştur  $F_{x,y} = \sum_{k=1}^M f_{x,y}$   $\{k=1,2,3\dots M\}$ ,  $M$  kaynak sayısıdır }
end for
for (i < n)
  { RRT'de belirlenen düğüm noktalarını (ABC'de kaynak)  $N_i = N_i + \Phi_i(N_i - F_{k,j})$ 
formülü ile

```

yenileri ile değiştir,
 Yeni düğümler için $obj = W_p * Pl + W_a Sm * + W_s Sa$ (maliyet fonksiyonu)
 fonksiyonunu hesapla
if (Yeni belirlenen düğümün maliyet fonksiyonu eskisinden daha iyi ise)
 { Hafızadaki eskinin yerini yeni düğüm ile değiştir}
end if
 Düğümlerin olasılıksal değerini hesapla
 Olasılık değerine göre rastgele düğüm oluştur
 En iyi olan yolu hafızaya kayıt et }
end for
until (İterasyon sayısına ulaşına kadar tekrar et)

RRT ve ABC melez algoritmasının geliştirilmesi ve uygulanması MATLAB Robotik Sistem Araç Kutusu (Robotic System Toolbox) içerisindeki önceden belirlenmiş Occupancy Grid haritası üzerinde gerçekleştirildi ve ardından iki tekerlekli robotun bu yolu izlemesi halinde harcadığı enerji hesaplandı.

2.4. İki Tekerli Mobil Robotlarda Enerji Modeli (Energy Model in Two Wheeled Mobile Robots)

Mobil robotlar yol alırken motorlarda tüketilen enerjinin minimize edilmesi hem enerji verimliliği açısından hem görevin mevcut sınırlı kaynaklar ile tamamlanabilmesi açısından önemlidir[29]. Dolayısıyla optimum rota belirlenirken harcanan enerjinin minimum olması istenir. Bu harcanan enerjinin optimize edilmesini sağlamak yolun en kısa mesafede en güvenilir rotada ve en uygun yumuşaklıkta kat edilmesi halinde sağlanacağı ön görülmektedir. Elde edilen optimum rotadaki enerji harcama değerini belirlemek için aracın hızına, dönüş açısına ve açısal hızına bağlı bir denklem çözümlenmelidir[29].

Liu ve Sun [29] iki tekerli mobil robotun optimum yolu hesaplarırken kullandığı maliyet fonksiyonuna enerji minimizasyon kriterini de katarak enerji harcamasını en aza indirmeyi hedeflemişlerdir. Çalışmada kinetik enerji, sürtünme enerjisi ve diğer kayıpları hesaba katarak enerji tüketimi formülleri türetilmiştir. Kinetik enerji aracın açısal ve lineer hızına bağlı olarak değişirken sürtünme kayıpları zeminin cinsine ve kat edilen yolun uzunluğuna bağlı olarak değişmektedir.

İki tekerli bir aracın sağ teker lineer hızı v_{right} sol teker lineer hızı v_{left} olarak gösterilerek denklem (2) ile hesaplanır;

$$\begin{bmatrix} v_{left} \\ v_{right} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -b \\ 1 & b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \quad 2$$

Verilen denklemde v mobil robotun lineer hızı, w açısal hızı ve b robotun iki teker arası mesafenin yarısıdır. Robotun kinetik enerji denklemi;

$$\begin{aligned} E_k(t) &= \frac{1}{2} m v(t)^2 + \frac{1}{2} I w(t)^2 \\ &= \int_t \left(d \left(\frac{1}{2} m v(t)^2 \right) + d \left(\frac{1}{2} I \omega(t)^2 \right) \right) dt \\ &= \int_t (mv(t)a(t) + I\omega(t)\beta(t)) dt \end{aligned} \quad 3$$

şeklinde yazılabilir. Formülde m robotun kütlesi ve I robotun atalet momentini ifade eden sabitler iken α ve β sırasıyla lineer ve açısal ivmelerdir.

Robotun yavaşlaması durumunda ivme negatif olur. Bu durumda formül harcanan bir miktar kinetik enerjinin elektrik enerjisine geri dönüşüymüş gibi bir sonuç verir. Ancak böyle bir durum söz konusu olmadığından kinetik enerji değerini sıfır ile pozitif değerler arasında aşağıdaki gibi sınırlanmıştır.

$$E_k(t) = \int_t (m \max\{v(t)a(t), 0\} + I \max\{\omega(t)\beta(t), 0\}) dt \quad 4$$

Yol alma sırasında sağ ve sol tekerlerle yüzey arasında bir enerji kaybı oluşur. Bu enerjiye sürtünme enerjisi denir. Sürtünme kayıpları denklem (5) ile hesaplanır.

$$E_f = 2\mu mgL \quad 5$$

Sürtünme kayıpları μ yüzeye bağlı sürtünme sabiti, m robotun kilogram cinsinden ağırlığı, g yerçekimi ivmesi ve L alınan yolun metre cinsinden değerine bağlı olarak değişmektedir. İki tekerlekli robot kullandığımızdan formülü iki ile çarpabiliriz. Denklem (5)'i iki tekerde harcanan sürtünme enerjisini hesaba katmak için iki ile çarpılmıştır.

Sürtünme enerjisi iki teker için harcanan güç cinsinden;

$$E_f(t) = \int_t (P_{left} + P_{right}) dt \quad 6$$

Şeklinde yazılabilir. Sağ ve sol tekerin harcanan gücü denklem (1)' deki hız formüllerini kullanarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\begin{bmatrix} P_{left} \\ P_{right} \end{bmatrix} = \mu mg \begin{bmatrix} |v(t) - b\omega(t)| \\ |v(t) + b\omega(t)| \end{bmatrix} \quad 7$$

P_{left} ve P_{right} değerleri denklem (6)' da yerine yazılırsa;

$$E_f(t) = 2\mu mg \int_t \max\{|v(t)|, |b\omega(t)|\} dt \quad 8$$

olarak ifade edilir.

Sensör den kaynaklı kayıplar, elektriksel kayıplar gibi mekanik olmayan diğer kayıplar zamanla değişmez ve dolayısıyla sabittir. Bu kayıp gücü P_s ile ifade edecek olursak denklem (9)'daki gibi kayıp enerjisi ifade etmiş oluruz.

$$E_D(t) = P_s t \quad 9$$

Sonuç olarak iki tekerli mobil robotun toplam kayıp gücü;

$$\begin{aligned} E_{total} &= E_k + E_f + E_D \\ &= \int_t (m \max\{v(t)a(t), 0\} + I \max\{\omega(t)\beta(t), 0\} + 2\mu mg \max\{|v(t)|, |b\omega(t)|\}) + P_s t \end{aligned} \quad 10$$

şeklinde ifade edilir.

Liu ve Sun [2014] çalışmalarında yukarıda verilen formüllerle elde ettiği enerji modelini kullanarak bir algoritma oluşturulmuştur. Algoritma sayesinde bulunan optimal yolu takip eden iki tekerli bir aracın rotayı izlerken harcadığı toplam enerji hesaplanabilmektedir.

İki tekerlekli mobil robotlar için Enerji Algoritması çalışmamızda MATLAB üzerinden, denklem (10)'da yerine yazılarak hesaplanmıştır. Formülde denklem (9)'da belirtilen toplam kayıp gücü ihmal edilmiştir.

3. DENEYSEL ÇALIŞMA (EXPERIMENTAL STUDY)

Bu çalışma, MATLAB Robotik Sistem Araç Kutusu (Robotic System Toolbox) kullanılarak simülasyon ortamında test edildi. İntel i7 7500U, 8 GB ram ve Ubuntu İşletim Sistemine sahip bir bilgisayar kullanıldı.

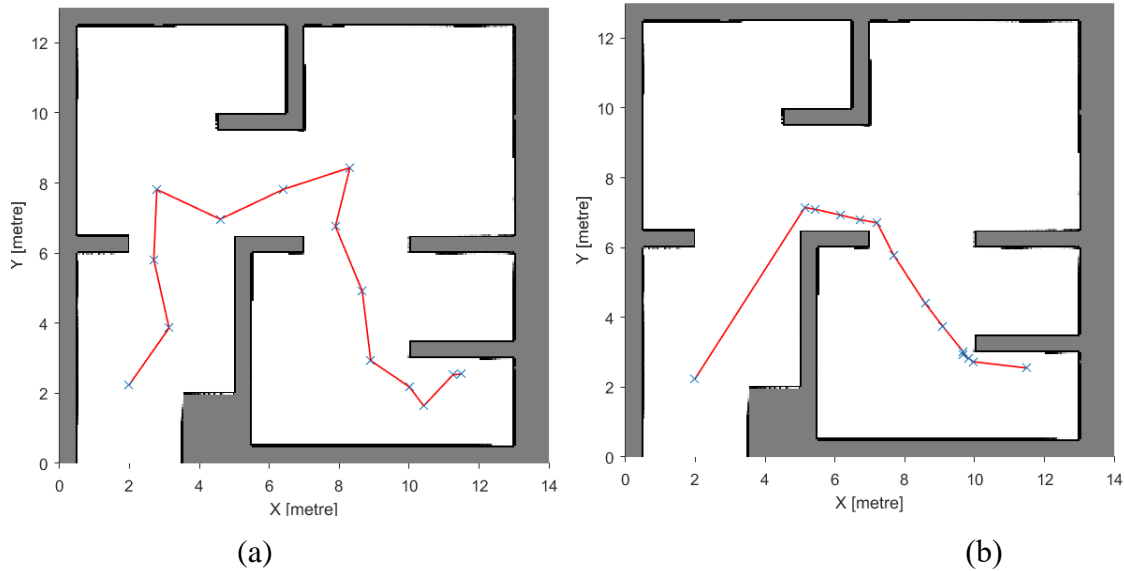
Algoritma ayrıca Robot İşletim Sistemi (ROS) ile de uyumludur, dolayısıyla gerçek zamanlı uygulamalara uygulanabilir. Bu çalışmada Gazebo 3D Robot simülatörlerine uygulanan algoritma da elde edilen veriler ile robotun harcadığı enerji hesaplandı.

MATLAB Robotik Sistem Araç Kutusu (Robotic System Toolbox) içerisindeki önceden belirlenmiş Occupancy Grid haritası iki boyutlu doluluk ızgara haritası oluşturur. Her bir hücrenin, o hücrenin doluluk olasılığını temsil eden bir değeri vardır. 1'e yakın değerler, hücrenin bir engel içerdiği yüksek bir kesinlik gösterir. 0'a yakın değerler, hücrenin engel bulundurmadığını kesin olarak belirtir. Haritanın özellikleri Tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1: Kullanılan haritanın özellikleri

Tanım	Değer
İşgal Edilen Alan Eşik Değeri	0.6500
Serbest Alan Eşik Değeri	0.2000
Olasılık Sınır Doygunluğu	[0.0010 0.9990]
Izgara Boyutu	[260 280]
Çözünürlüğü	20
X Eksen Limit Değeri	[0 14]
Y Eksen Limit Değeri	[0 13]
Uzaydaki Konumu	[0 0]

RRT ve RRT-ABC algoritmalarının haritada bulduğu yollar Şekil 1.a ve Şekil 1.b'de sunulmuştur.



Şekil 1. a. Başlangıç (B) ve sonuç (S) noktası belli haritada çalıştırılmış RRT
b. Başlangıç (B) ve sonuç (S) noktası belli haritada çalıştırılmış melez RRT-ABC

Kullandığımız maliyet fonksiyonunu sadece en kısa yolu hesaplamaz en ideal eğim faktörü ve en güvenli yol faktörünü de belirler. Belirlediğimiz problemde elde edilen değerler Tablo 2.'de karşılaştırıldı. En kısa yolun RRT-ABC melez algoritmasında elde edildiği ve bununla birlikte ABC algoritmasının tek başına problemi çözmesinden daha hızlı bir sonuç elde edildiği belirlendi. Robot hareket ederken keskin dönüşler yapmaması ve yumuşak geçişlerle yolunu tamamlaması, yumuşaklık değerinin (S_m) en küçük olması ile sağlanır. Melez algoritmanın RRT ve ABC ye göre daha akılcı bir yol bulduğu Tablo 2.'deki sonuçlardan açıkça görülmektedir. Güvenlik değerinin (S_a), ABC de büyük olması robotun gerekenden fazla uzaktan seyrettiğini, RRT de küçük olması güvenlik mesafesinin aşıldığını gösterir. Melez algoritmada daha uygun

bir mesafenin ayarlanması istediğimiz bir sonuçtur. Tablo 2.'de, benzetim sonuçları karşılaştırıldığında maliyet fonksiyonu en küçük olan melez algoritmanın daha verimli bir sonuç elde ettiği gösterildi. Önerilen melez algoritmanın daha yumuşak geçişlere sahip olması, minimum yolu seyretmesi daha az enerji sarfiyatı yaparak yolun tamamlanması anlamına gelmektedir. Bununla birlikte belirlediği yolun güvenli bir şekilde izlenmesi de dikkate alındı.

Tablo 2: Benzetim sonuçlarının karşılaştırılması

	RRT	ABC**	RRT-ABC
Yol Uzunluğu (PI), metre cinsinden	18.3386	19.1253	14.4993
Yumuşaklık-Akıcılık Değeri (Sm)	37.3402	52.7178	18.5757
Güvenlik Değeri (Sa)	0.3183	0.4818	0.3616
Maliyet fonksiyonu (obj fonksiyonu)	38.412	66.3731	30.1372
Bilgi işlem zamanı (saniye)	6.54	14.162	11.17

**ABC uygulaması MATLAB üzerinden Onak'ın algoritması kullanılarak gerçekleştirilmiştir [41].

Elde edilen benzetim sonuçlarının minimum enerji sarfiyatı yaptığı, maliyet fonksiyonundaki değişkenlerden tahmin edildi. Ancak kesin bir sonuca varabilmek için harcanan enerji belirlenmek istendi. Bunun için algoritmamızı iki tekerlekli robot simülasyonu olan Gazebo 3D Robot simütöründe çalıştırıp, aldığı yola karşı zaman değerleri kaydedildi. Melez algoritmanın çalıştırıldığı aynı Occupancy Grid haritası üzerinde alınan üç boyutlu uzaydaki x,y değerlerine karşılık, zaman değeri iki tekerlekli robotlarda enerji modelini kullanmaya olanak sağlandı.

Çalışmanın son aşamasında RRT, ABC ve melez RRT-ABC algoritmasının Gazebo 3D Robot simütörlerindeki değerleri kaydedilip iki tekerlekli mobil robotlarda enerji modeli algoritmasında MATLAB'da çalıştırılarak her üç yolu izlerken harcanan enerji Tablo 3.'deki gibi hesaplandı.

Tablo 3: RRT, ABC ve RRT-ABC algoritmalarında harcanan enerji

	RRT	ABC	RRT-ABC
İki tekerlekli mobil robotun harcadığı enerji (Joule)	505.2983	610.3465	519.7831

RRT algoritmasının melez algoritmaya göre çok daha hızlı çalışmasından, melez algoritmanın da RRT ye göre daha kısa bir yolu takip etmesinden dolayı, harcanan enerji değerleri birbirine çok yakın çıkmıştır. Bu iki parametrenin birbirini dengelemesi sonucunda, melez algortmada harcanan enerji, ABC algoritmasında harcanan enerjiye göre RRT algoritmasında harcanan enerjiye yaklaştığı gözlemlendi. RRT-ABC melez algoritmanın, ABC'nin sezgisel algoritma olmasından kaynaklı gerçek zamanlı problemlerde uygulanabilirliği avantajını da kullanarak, ABC'nin tek başına kullanılmasından daha az enerji sarfiyatı yaptığı gözlemlendi.

4. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada sezgisel ve klasik yöntemlerin avantajlarını birleştirerek, kullanılan RRT ve ABC algoritmalarına göre daha optimum bir yol elde eden yeni bir yöntem geliştirildi. RRT algoritması önceden keşfedilmiş ortamda başlangıç pozisyonundan hedef pozisyonuna ilerlerken engellerden kaçınarak en kısa yolu bulmaya çalışır. Fakat klasik bir yöntem olduğundan bulduğu yol optimum değildir. ABC sezgisel bir algoritma olduğundan evrensel optimum değerini bulmayı amaçlar. RRT-ABC algoritması, yol uzunluğu, yolun düzgünlüğü ve yol güvenliği için optimizasyon sürecine sahiptir. RRT-ABC algoritmasının başarısı, RRT hesaplama zamanının az olması avantajından ve evrensel minimumun ABC algoritması tarafından bulabilme kabiliyetinden kaynaklanmaktadır. Önerilen algoritmamız, deneysel çalışmalardaki karşılaştırmalarda görüldüğü gibi, ABC algoritmasından daha hızlı, daha yumuşak geçişli ve daha güvenlidir.

Ayrıca ABC 'den daha hızlı çalışan ve daha kısa yoldan takip eden RRT algoritması ile melez ABC-RRT algoritmasının enerji sarfiyatı açısından karşılaştırdığımızda melez algoritmanın ABC algoritmasına göre daha az enerji ile yolunu tamamladığı görüldü. Gerçek zamanlı problemlerde RRT-ABC melez algoritmasının kullanımı daha efektif sonuçlar elde etmemize olanak sağlar. Gelecekteki çalışmalarda, dinamik engellere çarpmaktan kaçınabilen daha az enerji ile çalışan algoritmalar geliştirmek bu problemin

iyileştirilmesi açısından yeni dallanmalar ile daha yumuşak geçişli daha optimum yollar bulmak ana hedefler olabilir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Katkılarından dolayı Sivas Cumhuriyet Üniversitesi ROBOLAB ekibine teşekkürlerimizi sunarız.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Klancar, G., Zdesar, A., Blazic, S., & Skrjanc, I. Wheeled mobile robotics: from fundamentals towards autonomous systems. Butterworth-Heinemann, 2017.
- [2] Montiel, O., Orozco-Rosas, U., & Sepúlveda, R., Path planning for mobile robots using Bacterial Potential Field for avoiding static and dynamic obstacles. *Expert Systems with Applications*, 42(12), 5177-5191, 2015.
- [3] Mac, T. T., Copot, C., Tran, D. T., & De Keyser, R., Heuristic approaches in robot path planning: A survey. *Robotics and Autonomous Systems*, 86, 13-28, 2016.
- [4] Rosell, J., & Iniguez, P., Path planning using harmonic functions and probabilistic cell decomposition. In *Proceedings of the 2005 IEEE international conference on robotics and automation*. IEEE. pp. 1803-1808. Apr., 2005.
- [5] Šeda, M., Roadmap methods vs. cell decomposition in robot motion planning. In *Proceedings of the 6th WSEAS International Conference on Signal Processing, Robotics and Automation*. World Scientific and Engineering Academy and Society (WSEAS). pp. 127-132. Feb., 2017.
- [6] Cosío, F. A., & Castañeda, M. P., Autonomous robot navigation using adaptive potential fields. *Mathematical and computer modelling*, 40(9), 1141-1156, 2004.
- [7] Yin, L., Yin, Y., & Lin, C. J., A new potential field method for mobile robot path planning in the dynamic environments. *Asian Journal of Control*, 11(2), 214-225, 2009.
- [8] Zhang, Q., Yue, S. G., Yin, Q. J., & Zha, Y. B., Dynamic obstacle-avoiding path planning for robots based on modified potential field method. In *International Conference on Intelligent Computing*. Springer Berlin Heidelberg, pp. 332-342, Jul., 2013.
- [9] Singh, N. N., Chatterjee, A., Chatterjee, A., & Rakshit, A., A two-layered subgoal based mobile robot navigation algorithm with vision system and IR sensors. *Measurement*, 44(4), 620-641, 2011.
- [10] Liu, H., Wan, W., & Zha, H. A dynamic subgoal path planner for unpredictable environments. In *Robotics and Automation (ICRA), 2010 IEEE International Conference on*. IEEE. pp. 994-1001. May., 2010.
- [11] Candido, S., Kim, Y. T., & Hutchinson, S., An improved hierarchical motion planner for humanoid robots. In *Humanoids 2008-8th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*. IEEE. pp. 654-661. Dec., 2008.
- [12] Lee, J., Kwon, O., Zhang, L., & Yoon, S. E., A selective retraction-based RRT planner for various environments. *IEEE Transactions on Robotics*, 30(4), 1002-1011, 2014.
- [13] Hidalgo-Paniagua, A., Vega-Rodríguez, M. A., & Ferruz, J., Applying the MOVNS (multi-objective variable neighborhood search) algorithm to solve the path planning problem in mobile robotics. *Expert Systems with Applications*, 58, 20-35. 2016.
- [14] Dezfoulian, S. H., Wu, D., & Ahmad, I. S., A generalized neural network approach to mobile robot navigation and obstacle avoidance. In *Intelligent Autonomous Systems 12*. Springer Berlin Heidelberg, pp. 25-42, 2013.
- [15] Singh, M. K., & Parhi, D. R., Path optimisation of a mobile robot using an artificial neural network controller. *International Journal of Systems Science*, 42(1), 107-120, 2011.

- [16] Al-Sagban, M., & Dhaouadi, R., Neural-based navigation of a differential-drive mobile robot. In Control Automation Robotics & Vision (ICARCV), 2012 12th International Conference on IEEE. pp. 353-358, Dec., 2012.
- [17] Chang, H., & Jin, T., Command Fusion Based Fuzzy Controller Design for Moving Obstacle Avoidance of Mobile Robot. In Future Information Communication Technology and Applications. Springer Netherlands, pp. 905-913, 2013.
- [18] Abdessemed, F., Faisal, M., Emmadeddine, M., Hedjar, R., Al-Mutib, K., Alsulaiman, M., & Mathkour, H., A hierarchical fuzzy control design for indoor mobile robot. International Journal of Advanced Robotic Systems, 11, 2014.
- [19] Morales, N., Toledo, J., & Acosta, L., Path planning using a Multiclass Support Vector Machine. Applied Soft Computing, 43, 498-50, 2016.
- [20] Roberge, V., Tarbouchi, M., & Labonté, G., Comparison of parallel genetic algorithm and particle swarm optimization for real-time UAV path planning. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 9(1), 132-141, 2013.
- [21] Alajlan, M., Koubâa, A., Châari, I., Bennaceur, H., & Ammar, A., Global path planning for mobile robots in large-scale grid environments using genetic algorithms. In Individual and Collective Behaviors in Robotics (ICBR), 2013 International Conference on IEEE, pp. 1-8, Dec., 2013.
- [22] Oleiwi, B. K., Al-Jarrah, R., Roth, H., & Kazem, B. I., Multi Objective Optimization of Trajectory Planning of Non-holonomic Mobile Robot in Dynamic Environment Using Enhanced GA by Fuzzy Motion Control and A. In International Conference on Neural Networks and Artificial Intelligence. Springer International Publishing, pp. 34-49, Jun., 2014.
- [23] Karami, A. H., & Hasanzadeh, M., An adaptive genetic algorithm for robot motion planning in 2D complex environments. Computers & Electrical Engineering, 43, 317-329, 2015.
- [24] Wang, G., Guo, L., Duan, H., Liu, L., & Wang, H., A bat algorithm with mutation for UCAV path planning. The Scientific World Journal, 2012.
- [25] Das, P. K., Behera, H. S., & Panigrahi, B. K., A hybridization of an improved particle swarm optimization and gravitational search algorithm for multi-robot path planning. Swarm and Evolutionary Computation, 28, 14-28, 2016.
- [26] Zhang, Y., Gong, D. W., & Zhang, J. H., Robot path planning in uncertain environment using multi-objective particle swarm optimization. Neurocomputing, 103, 172-185, 2013.
- [27] Chen, X., Kong, Y., Fang, X., & Wu, Q., A fast two-stage ACO algorithm for robotic path planning. Neural Computing and Applications, 22(2), 313-319, 2013.
- [28] Karaboga, D., & Basturk, B., A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: artificial bee colony (ABC) algorithm. Journal of global optimization, 39(3), 459-471, 2007.
- [29] Liu, S., & Sun, D., Minimizing Energy Consumption of Wheeled Mobile Robots via Optimal Motion Planning. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 19(2), 401-411. doi:10.1109/tmech.2013.2241777, 2014.
- [30] Martin, S. R., Wright, S. E., & Sheppard, J. W., Offline and online evolutionary bi-directional RRT algorithms for efficient re-planning in dynamic environments. In Automation Science and Engineering, 2007. CASE 2007. IEEE International Conference on .IEEE, pp. 1131-1136, Sept., 2007.
- [31] Zhao, D., & Yi, J., Robot planning with artificial potential field guided ant colony optimization algorithm. In International Conference on Natural Computation .Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 222-231, Sept., 2006.
- [32] Santiago, R. M. C., De Ocampo, A. L., Ubando, A. T., Bandala, A. A., & Dadios, E. P. ,Path planning for mobile robots using genetic algorithm and probabilistic roadmap. In Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment and Management (HNICEM), 2017 IEEE 9th International Conference on .IEEE, pp. 1-5, Dec., 2017.

- [33] Chen, Y., Su, F., & Shen, L. C., Improved ant colony algorithm base on PRM for UAV route planning. *Journal of System Simulation*, 21(6), 1658-1666, 2009.
- [34] Masehian, E., & Sedighzadeh, D., Multi-objective PSO-and NPSO-based algorithms for robot path planning. *Advances in electrical and computer engineering*, 10(4), 69-76, 2010.
- [35] LaValle, S. M., Rapidly-exploring random trees: A new tool for path planning. TR 98-11, Computer Science Dept., Iowa State Univ. , Oct., 1998.
- [36] Kuffner, James J., and Steven M. LaValle. "RRT-connect: An efficient approach to single-query path planning." *Robotics and Automation*, 2000. Proceedings. ICRA'00. IEEE International Conference on. Vol. 2. IEEE, 2000.
- [37] Ardiyanto, J. Miura, Real-time navigation using randomized kinodynamic planning with arrival time field, *Robot. Auton. Syst.* 60 (2012) 1579–1591.
- [38] Karaboğa, D.,Yapay Zeka Optimizasyon Algoritmaları, 2014.
- [39] Karaboga, D., & Basturk, B., Artificial bee colony (ABC) optimization algorithm for solving constrained optimization problems. In *International fuzzy systems association world congress* (pp. 789-798). Springer, Berlin, Heidelberg, Jun., 2007.
- [40] UZLU E . Türkiye için gri kurt optimizasyon algoritması ile yapay sinir ağlarını kullanarak enerji tüketiminin tahmini. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*. 2019; 7(2): 262-245.
- [41] MathWorks internet sayfası.<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/55177-robot-path-planning?focused=5915988&tab=function> (2016).

Production and Characterization of P3HT:PCBM Photoactive Layer Based Inverted Polymer Solar Cells

İdris CANDAN^{1,*}  Yunus ÖZEN^{2,3} ¹Kocaeli University, Faculty of Arts and Science, Department of Physics, 41001, İzmit/KOCAELİ²Gazi University, Faculty of Science, Department of Physics, 06500, Yenimahalle/ANKARA³Gazi University, Photonics Application and Research Center, 06500, Yenimahalle/ANKARA

Graphical/Tabular Abstract

Article Info:

Research article

Received: 17/09/2019

Revision 24/10/2019

Accepted: 29/10/2019

Highlights

- Production of Inverted polymer solar cells (IPSC).
- Coating Metal oxide layer by using sputtering technique.
- Comparison of ETL effects on the P3HT:PCBM based IPSC.

Keywords

Inverted Polymer Solar Cells (IPSC)
 Metal Oxides
 P3HT:PCBM

In this study, inverted polymer solar cells (IPSC) with transparent metal oxides of tin oxide (SnO₂), titanium dioxide (TiO₂) and zinc oxide (ZnO) thin films were fabricated by using sputtering method and the solar cell structures of Glass/FTO/SnO₂/Polymer/MoO₃/Ag, Glass/FTO/TiO₂/Polymer/MoO₃/Ag and Glass/FTO/ZnO/Polymer/MoO₃/Ag were produced by using well-cleaned fluorine doped tin oxide coated glass (Glass/FTO) substrates and P3HT:PCBM polymer photoactive layer.

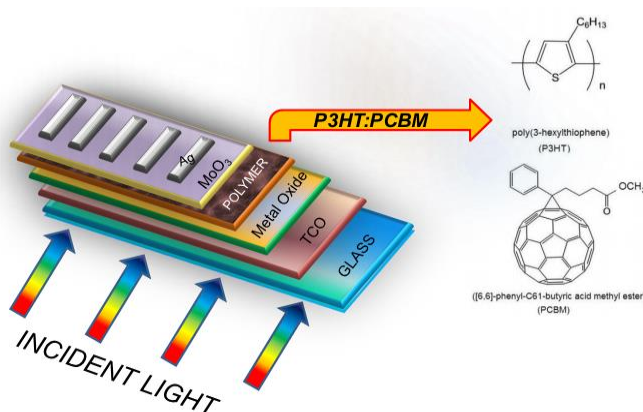


Figure A. Schematic representation of inverted polymer solar cell (IPSC) structure.

Purpose: In this study, the effects of transparent metal oxides as electron transport layer on photovoltaic performance of IPSC were investigated and the power conversion efficiencies (PCE) of cells with metal oxide layers of SnO₂, TiO₂ and ZnO were measured under AM 1.5 solar illuminations.

Theory and Methods: In order to analyze the effects of electron transport layers (ETL) of SnO₂, TiO₂ and ZnO inside polymer based IPSC, three different devices were coated onto high quality and well-cleaned FTO coated glass substrates as illustrated in **Figure A**. A sputtering system was used to growth all metal oxide layers. Then, a solution of blended P3HT:PCBM was spin coated onto Glass/FTO/metal oxide substrates with 600 rpm for 20 seconds and 1100 rpm for 9 seconds at room temperature. 10 nm molybdenum trioxide (MoO₃) as a anode buffer layer (ABL) and 100 nm silver (Ag) layers were coated by using a thermal deposition method.

Results: The Power conversion efficiencies (PCE) of IPSC with SnO₂, TiO₂ and ZnO layers were calculated as 1.62, 2.78 and 3.32 %, respectively. The device with sputtered SnO₂ demonstrated a short-circuit current (J_{SC}) of 6.1 mA/cm², open-circuit voltage (V_{OC}) of 0.74 V and fill factor (FF) of 35%, while the devices with device with sputtered TiO₂ indicated a J_{SC} of 9.9 mA/cm², V_{OC} 0.81 V and FF of 35% and the device with sputtered ZnO layer exhibited a J_{SC} of 8.1 mA/cm², V_{OC} 0.91 V and FF of 44%.

Conclusion: The photovoltaic performances of IPSC with different metal oxide layers showed that the cell with ZnO layer has higher PCE value than the cells with SnO₂ and TiO₂ layers.



P3HT:PCBM Fotoaktif Tabanlı Tersine Çevrilmiş Polimer Güneş Hücrelerinin Üretimi ve Karakterizasyonu

İdris CANDAN¹, * Yunus ÖZEN^{2,3}

¹Kocaeli Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, 41001, İzmit/KOCAELİ

²Gazi Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, 06500, ANKARA

³Gazi Üniversitesi, Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi, 06500, ANKARA

Öz

Bu çalışmada, SnO₂, TiO₂ ve ZnO şeffaf metal oksit ince filmler kullanılarak tersine çevrilmiş güneş hücreleri üretildi. Cam/flor katkılı kalay oksit (Glass/FTO) alttaşlar ve P3HT:PCBM polimer foto-aktif katmanı kullanılarak Cam/FTO/SnO₂/Polimer/MoO₃/Ag, Cam/FTO/TiO₂/Polimer/MoO₃/Ag ve Cam/FTO/ZnO/Polimer/MoO₃/Ag güneş hücresi yapıları üretildi. Şeffaf metal oksitler püskürtme yöntemi, polimer tabası ise dönel kaplama yöntemi kullanılarak kaplandı. Kaplama sonrası SnO₂, TiO₂, ZnO ve P3HT:PCBM polimer katmanlarının yüzey morfolojileri Atomik Kuvvet Mikroskopu (AFM) yardımı ile analiz edildi. Ayrıca, polimer katmanının kaplama sonrasında zamana göre kuruma süreci görüntülendi. Üretilen tersine çevrilmiş güneş hücrelerinde elektron taşıma tabakası olarak görev yapan şeffaf metal oksitlerin güneş hücrelerinin fotovoltaj performansına etkileri AM 1.5 Güneş altına incelendi ve püskürtme yöntemi ile kaplanan SnO₂, TiO₂ ve ZnO tabakalarına sahip hücrelerin güç dönüşüm verimlilikleri sırayla %1.62, %2.78 ve %3.32 olarak ölçüldü.

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 17/09/2019
Düzeltilme: 24/10/2019
Kabul: 29/10/2019

Anahtar Kelimeler

Tersine çevrilmiş güneş hücreleri
Metal oksitler
P3HT:PCBM

Production and Characterization of P3HT:PCBM Photoactive Layer Based Inverted Polymer Solar Cells

Abstract

In this study, inverted polymer solar cells (IPSC) were produced by using transparent metal oxides of SnO₂, TiO₂ ve ZnO thin films. The solar cell structures of Glass/FTO/SnO₂/Polymer/MoO₃/Ag, Glass/FTO/TiO₂/Polymer/MoO₃/Ag and Glass/FTO/ZnO/Polymer/MoO₃/Ag were produced by using Glass/fluorine doped tin oxide (Glass/FTO) substrates and P3HT:PCBM polymer photoactive layer. A sputtering system was used to coat the transparent metal oxides and a spin coating system was used to deposit polymer layer. The surface morphologies of SnO₂, TiO₂, ZnO and P3HT:PCBM polymer layers analyzed by Atomic Force Microscope (AFM). Moreover, the drying process of the polymer layer over time after coating was pictured. The effects of transparent metal oxides as electron transport layer on photovoltaic performance of produced inverted polymer solar cells (IPSC) under AM 1.5 solar illumination was examined and the power conversion efficiencies (PCE) of cells with SnO₂, TiO₂ and ZnO layers were measured as 1.62%, 2.78% and 3.32%, respectively.

Keywords

Inverted polymer solar cells (IPSC)
Metal oxides
P3HT:PCBM

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Son yıllarda organik yarıiletken tabanlı güneş hücreleri esnek malzemelerde çalışma olanağı sağlaması ve basit fabrikasyon süreçleri ile kolay şekillendirilebilme özellikleri, ayrıca ucuz üretim teknikleri ile üretilebilme olanakları sunmasından dolayı bilim dünyasında ve sanayide alternatif bir enerji kaynağı olarak oldukça ilgi çekmektedir. Ayrıca, organik yarıiletkenlerin yapısının büyük bir kısmını karbon (C), hidrojen (H) ve oksijen (O) elementleri ve bunların bileşimlerinden meydana geldiğinden çevre ile son derece uyumlu, temiz ve güvenli teknolojik malzemeler olarak öne çıkmaktadır.

Organik malzemelerin elektronik ve optik özelliklerinin incelenmesi ve bunların opto-elektronik bir aygıt olarak kullanma düşüncesi yirminci yüzyılın başlarına dayanır [1]–[3]. 1954’de peryline-iodine yapısının

yüksek iletkenlik özelliklerinin yoğun bir şekilde araştırılması, organik yarıiletken malzemelerin hızla gelişmesi 1970'lerde yarıiletken polimer yapılarının bulunmasına olanak sağladı [4], [5]. Yarıiletken polimer malzemelerin keşfedilmesi ile organik yarıiletkenler konusunda çalışmalar hız kazanarak bu yapıların yüksek elektronik verimliliği sayesinde günümüzdeki organik fotovoltaiik (OPV), organik alan etkili transistor (OFET) ve organik yarıiletken diyot (OLED) teknolojilerinin gelişmesine olanak sağladı [6], [7]. Organik fotovoltaiik aygıtlar, üzerlerine düşen elektromagnetik radyasyonu elektrik enerjisine çeviren yapılardır. Basit ve ucuz üretim tekniklerinden dolayı inorganik güneş hücrelerine alternatif olarak düşünülmektedirler. Ayrıca, organik güneş hücrelerinin esnek malzemelerin yüzeyine üretilebilmesi ve bu malzemelerin hafif olması, taşınabilir güneş hücre uygulamalarına olanak sağlamaktadır. Organik yarıiletken kristal malzemelerde fotoakım ilk defa 1959 yılında Kallmann ve Pope tarafından gözlenmiş ve takip eden yıllarda çeşitli yapılarda organik güneş hücreleri farklı bilim insanları tarafından üretilmeye devam edilmiş fakat üretilen organik güneş hücresinde verimlilik %0.1 civarında kalmıştır [8], [9]. Organik fotovoltaiik malzelerde donör-akseptör yapısı 1986 yılında Ching Tang tarafından geliştirilerek OPV yapılarında %1 civarında verimlilik elde edilmiştir [6]. Bu gelişmeyi takip eden yıllarda bulk heteroeklem yapıların daha verimli olduğu keşfedilmiş ve son yıllarda organik yapılu güneş hücrelerin verimliliği %16.5 değerine ulaşmıştır [10]. Polimer tabanlı organik yarıiletken güneş hücrelerinin çalışma prensibi genel olarak, eksiton üretiminin gerçekleşmesini sağlayan elektromagnetik radyasyonun absorpsiyonu, donör ve akseptör yapılarından oluşan eklem bölgesinde eksitonların difüzyonu, eklem bölgesinde oluşan iç elektrik alan tarafından eksitonların ayrışması ile serbest taşıyıcıların yapı içerisine hareket etmesi ile bu taşıyıcıların elektrotlara iletilmeleri ve toplanmaları şeklinde verilebilir. Organik foto-aktif katmanının absorpsiyon katsayısının yüksek ($\sim 10^5 \text{ cm}^{-1}$) olmasından dolayı bu tabaka çok ince olacak şekilde üretilebilmektedir [11]. Foto-aktif katmanın bant aralığı en yüksek dolu moleküler orbital seviyesi (HOMO) ve en düşük boş orbital seviyesi (LUMO) arasındaki enerji farkı tarafından belirlenir. Organik yarıiletkenlerin bant aralığı değerleri 1 eV ile 4 eV arasındadır. HOMO seviyesinden elektron kopararak p-tipi ve LUMO seviyesine elektron eklenerek n-tipi organik katkılı yarıiletkenler elde edilebilir [12].

Geleneksel yapıdaki organik güneş hücrelerinde TCO olarak genellikle görünür bölgede en az %80 veya daha fazla geçirgenlik değerine sahip İndium Kalay Oksit (Indium Tin Oxide, ITO), Florin Kalay Oksit (Flourine Tin Oxide, FTO) ve Poli Polistiren sülfonat (poly(3,4-ethylenedioxythiophene) polystyrene sulfonate PEDOT: PSS) kullanılmaktadır. Bu özellikteki malzemelerin kullanım amacı ise bölge fotonlarının foto-aktif katmana erişmesini sağlamaktır [13]. Organik foto-aktif tabakanın içerisinde elektron-boşluk çiftleri (electron-hole pairs) yalnızca fotonların emilimi ile oluşturulabilir. Foto-aktif tabaka içerisindeki iç elektrik alan sayesinde 5 nm ile 20 nm arasında difizyon uzunluğu değerine sahip elektronlar ve boşluklar molekülden moleküle hareket ederek serbest hale geçebilir ve iş foksionları farklı olan üst elektrot ve alt elektrota kadar ulaşarak toplanabilirler ya da bazı elektronlar ve boşluklar yeniden birleşerek (recombination) yok olabilirler [14]–[17]. Geleneksel yapıdaki organik güneş hücrelerinde TCO tabakası ile foto-aktif bölge katmanı arasında elektron engelleyici tabaka bulunur ve foto-aktif tabaka iki farklı katmandan (donör-akseptör katmanları) meydana gelmiştir ve çift katmanlı heteroeklem (bilayer heterojunction) yapılar olarak adlandırılırlar. Fakat, bu yapıdaki güneş hücrelerinde donör malzemenin HOMO seviyesi ile akseptör malzemenin LUMO seviyesi arasındaki bant enerji kayması eksitonların ayrışması engelleyerek yük taşınımında yeterli seviyeye ulaşımına engel olmaktadır. Bu sorunla başa çıkmak için, 1995 yılında Yu ve arkadaşları tarafından polimer tabanlı organik güneş hücreleri için bulk hetero-eklem (bulk heterojunction, BHJ) yapısı geliştirilmiştir [18]. Bu yapılarda foto-aktif tabaka p-tipi organik polimer malzeme ile n-tipi fullerine tabanlı organik malzemenin karışımından meydana gelir. Bulk hetero-eklem yapısı içerisinde her yerdeki donör-akseptör ara yüzeylerine fotonlar tarafından eksitonlar üretilebilir ve bu eksitonlar bir kaç nanometre mesafede ayrışarak serbest yük taşıyıcılara dönüşebilir. Bu serbest yük taşıyıcılar elektrotlara ulaşarak foto-akım oluşturabilirler. Foto-aktif katman ile anot ve katot arasındaki direnç omik ve bulk organik malzemenin direncine göre ihmal edilebilecek kadar küçük olmalıdır [19]. Geleneksel tipik bir organik güneş hücresinde, foto-aktif tabaka genellikle kalsiyum (Ca) gibi malzemeler kullanılarak oluşturulan üst katot tampon katmanı (cathode buffer layer, CBL) ile genellikle PEDOT: PSS polimerinden oluşturulan alt anot tampon katmanı (anode buffer layer, ABL) arasına yerleştirilir. Fakat bu yapıdaki organik güneş hücrelerinde kalsiyumun yapısından kaynaklı oksitlenmelerden dolayı zamanla performans kaybı oluşmaktadır [20]. Bu sorunun önüne geçmek ve uzun ömürlü güneş hücreleri üretmek için, 2004 yılında Shirakawa ve ekibi tarafından ters çevrilmiş polimer güneş hücreleri (inverted polimer solar cell, IPSC) dizayn edildi [21]. İlk ters çevrilmiş güneş hücresinde

CBL olarak kullanılan Ca yerine ZnO ve ABL olarak kullanılan PEDOT:PSS yerine de MoO₃ kullanıldı ve yapı tersten inşa edildi [21]. Ters çevrilmiş polimer güneş hücrelerinde, ZnO tabakası elektron taşıma tabakası (electron transport layer, ETL) ve aynı zamanda boşluk bloke edici tabaka (hole blocking layer) olarak ve MoO₃ tabakası elektron bloke edici tabaka (electron blocking layer) olarak kullanıldı [21]. Ayrıca, ters çevrilmiş polimer güneş hücrelerinde TiO₂, SnO₂, Al₂O₃ ve In₂O₃ gibi çeşitli metal oksit malzemeler de ETL olarak ZnO tabakası yerine kullanılmaktadır [22]–[27]. Bunlara ek olarak, bu tasarımlarda yapı içerisinde iş fonksiyonunun uyumu için aktif bölge ve elektrotlar farklı tip malzemelerden seçilir. Genellikle, organik yarıiletken tabanlı güneş hücrelerinde, 4.7 eV iş fonksiyonu değerine sahip İndium Kalay Oksit (Indium Tin Oxide, ITO) ve 5 eV iş fonksiyonu değerine sahip Florin Kalay Oksit (Flourine Tin Oxide, FTO) anot malzemesi olarak kullanılmaktadır [28]–[30].

Ters çevrilmiş polimer güneş hücrelerinde foto-aktif bölge katmanı, genellikle donör olarak HOMO seviyesi -5.2 eV ve LUMO seviyesi -3.5 eV olan Poly (3-hexylthiophene-2, 5-diy) (P3HT) konjuge polimer malzeme ve akseptör olarak HOMO seviyesi -6.1 eV ve LUMO seviyesi -3.7 eV olan poly (6, 6-phenyl C61-butyric acid methyl ester) (PCBM) fullerine bazlı malzemelerinin karışımından oluşturulmaktadır [31]. P3HT polimer malzeme p-tipi özellikte olup bant enerji aralığı 1.7 eV ile 2.1 eV aralığındadır [32], [33]. Fullerin bazlı PCBM malzeme n-tipi özellikte olup bant enerji 1.3 eV ile 1.9 eV aralığındadır [34]. Ayrıca, her iki organik yarıiletken malzeme kloform (chloroform), klorobenzen (chlorobenzene), diklorobenzen (dichlorobenzene) ve toluene gibi organik çözücüler içerisinde kolayca çözülebildiklerinden bu iki malzeme BHJ yapıdaki foto-aktif tabaka için mükemmel adaylardır.

Bu çalışmada, SnO₂, TiO₂ ve ZnO metal oksit elektron transfer katmanlı ve P3HT:PCBM polimer foto-aktif tabakalı tersine çevrilmiş güneş polimer güneş hücreleri aynı koşullarda üretildi ve bu hücrelerin enerji verimlilik değerleri ölçülerek karşılaştırıldı.

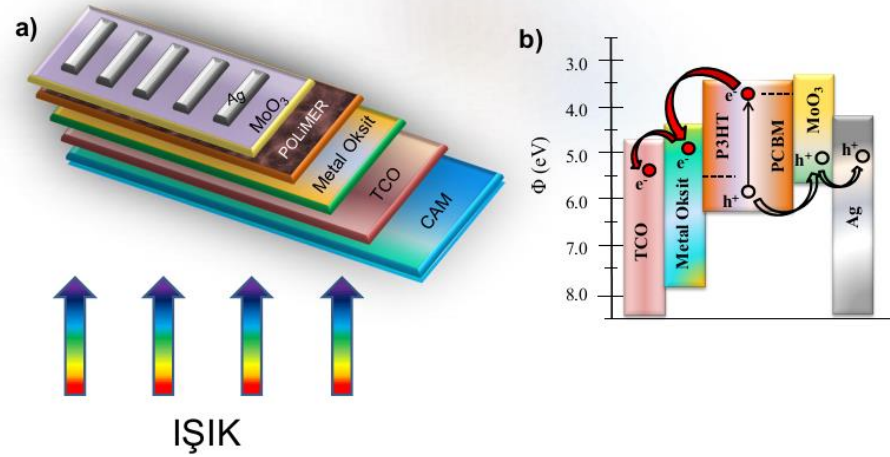
2. DENEYSEL METODLAR (EXPERIMENTAL METHODS)

2.1 Tersine Çevrilmiş Polimer Güneş Hücrelerinin Üretimi (Production of Inverted Polymer Solar Cells)

Bu çalışmada, hazır olarak temin edilen %85 optik geçirgenliğe sahip flor katkılı kalay oksit (FTO) kaplı cam alttaşlar üzerine farklı elektron taşıma tabakasına (ETL) sahip ve **Şekil 1 (a)**'da gösterilen geometride ve **Şekil 1 (b)**'deki gibi enerji bant aralıklarına sahip Cam/FTO/SnO₂/Polimer/MoO₃/Ag, Cam/FTO/TiO₂/Polimer/MoO₃/Ag ve Cam/FTO/ZnO/Polimer/MoO₃/Ag yapısında üç adet tersine çevrilmiş güneş hücresi numunesi üretildi.

2.1.1 Alttaşların Temizliği (Substrates Cleaning)

Üretim aşamalarına geçmeden önce FTO alttaşlar organik ve inorganik kirliliklerden arındırılma işlemine tabi tutuldu. Temizleme işleminde, alttaşlar öncelikli olarak deterjan ve saf su (DI-H₂O) dolu beherler içerisinde ultrasonik olarak 5 dakika tutuldu ve ardından saf su ile durulandı. İkinci aşamada, numuneler ultrasonik banyoda farklı kaplarda 10'ar dakika süreler ile sırasıyla saf aseton, izopropil alkol ile temizlendi ve saf su (DI-H₂O) ile durulandı. Son olarak, FTO alttaşlar yüksek saflıktaki azot (N₂) gazı ile kurutularak metal oksit kaplama işlemine geçildi.



Şekil 1: Cam/FTO/Metal Oksit/Polimer/MoO₃/Ag yapıdaki tersine çevrilmiş polimer güneş hücresinin (a) şematik gösterimi, (b) yapıyı oluşturan katmanların bant pozisyonları.

2.1.2 Metal Oksit Tabakasının Kaplanması (Deposition of Metal Oxide Layer)

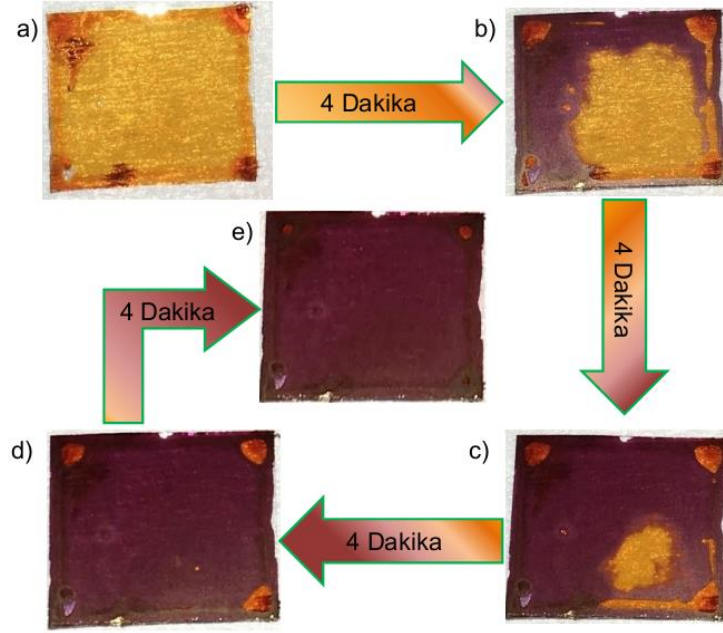
İyi temizlenmiş FTO kaplı cam alttaşlar üzerine ETL görevi görecek olan SnO₂, TiO₂ ve ZnO metal oksit kaplamalar Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi bünyesinde bulunan Nanovak NVT500 Sıçratma (Sputtering) sistemi kullanılarak ayrı ayrı kaplandı. Temizlenmiş FTO kaplı cam alttaşlar (Cam/FTO) sıçratma cihazının yükleme odasına yüklendi ve sistem vakuma alındı. Yüksek saflıkta SnO₂ (%99.999) hedeften 50 - 60 nm civarında bir kalınlıkta kaplandı ve elde edilen Cam/FTO/SnO₂ numune 250 °C sıcaklıkta ısıl işleme tabi tutuldu. Aynı işlemler yüksek saflıktaki TiO₂ (%99,999) ve ZnO (%99.999) hedefler kullanılarak ayrı ayrı elde edilen Cam/FTO/TiO₂ ve Cam/FTO/ZnO numuneleri için de uygulandı.

2.1.3 Polimer Çözeltisinin Hazırlanması (Preparation of Polymer Solution)

Bu çalışmada foto-aktif polimer tabakası için tersine çevrilmiş güneş hücrelerinde yaygın olarak kullanılan Poly (3-hexylthiophene-2, 5-diyl) (P3HT) ve poly (6, 6-phenyl C61-butyric acid methyl ester) (PCBM) karışım çözeltisi kullanıldı. Karışım polimer çözeltisi, hazır temin edilen P3HT ve PCBM polimerlerinden eşit ağırlıkta karıştırılması ve konsantrasyonu 20 mg/mL olacak şekilde diklorobenzen (dichlorobenzene) çözücüsü eklenerek 80 °C sıcaklıkta 14 saat manyetik karıştırıcı ile homojen bir şekilde karışması sağlanacak şekilde hazırlandı.

2.1.4 Foto-aktif Polimer Tabakanın Kaplanması (Deposition of Polymer Photoactive Layer)

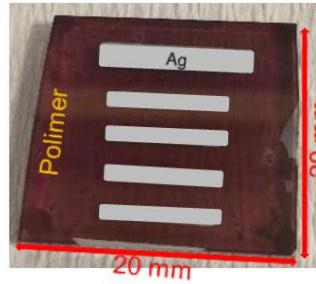
Hedeflenen tersine çevrilmiş güneş hücre yapısının elde etmek için, önceden hazırlanan Cam/FTO/SnO₂, Cam/FTO/TiO₂ ve Cam/FTO/ZnO numunelerinin üzerine dönel kaplama cihazı (spin coating) yardımı ile polimer çözeltisi kaplandı. Kaplama yapılan her bir örnek için 25 µL polimer çözeltisi kullanıldı ve Süss Microtec 6 RC marka dönel kaplama sisteminde (Süss Microtec 6 RC spin coater system) önce 600 rpm hızda 20 saniye ve sonra 1100 rpm hızda 9 saniye döndürülerek foto-aktif polimer ile kaplandı. Polimer tabakanın kuruması için çözelti ile kaplanan örnekler oda sıcaklığında yaklaşık 15-16 dakika beklendi. Polimer tabakanın kaplanmasından sonra bekletilen numunelerin her 4 dakika için, kaplanmış örneğin üzerindeki polimerin kuruma sürecinin görüntüleri Şekil 2'de verilmiştir. Kuruma süreci tamamlanan örnekler, daha sonra sıcak yüzey (hot plate) üzerinde 150 °C sıcaklıkta 5 dakika ısıl işleme tabi tutuldu.



Şekil 2: P3HT:PCBM polimer tabakanın kaplandıktan sonra bekletilen numunelerin her 4 dakika aralıklarla çekilen kuruma sürecinin görüntüleri.

2.1.5 Metal Kontakt Kaplama İşlemi (Metal Contact Coating Process)

Cam/FTO/Metal Oksit/Polimer/MoO₃/Ag yapısını elde etmek için, polimer tabakası kaplanmış tüm örnekler BesTec marka termal buharlaştırıcı sistemi (BesTec thermal evaporation system) içerisine yerleştirildi ve vakuma alındı. Birinci aşamada, polimer katmanı üzerine 10⁻⁶ mbar başlangıç basıncında ve oda sıcaklığında elektron bolke edici ve hole taşıyıcı tabaka olarak 10 nm MoO₃ tabakası kaplandı. Daha sonra aynı vakum çemberi içerisinde üst metal kontakt olarak kullanılmak için 100 nm kalınlığında gümüş (Ag) tabakası kaplandı ve Şekil 3'te verilen 20 mm x 20 mm boyutlarındaki tersine çevrilmiş polimer güneş hücresi yapısı elde edildi.



Şekil 3: Metal kontaktları oluşturulmuş tersine çevrilmiş polimer güneş hücresi.

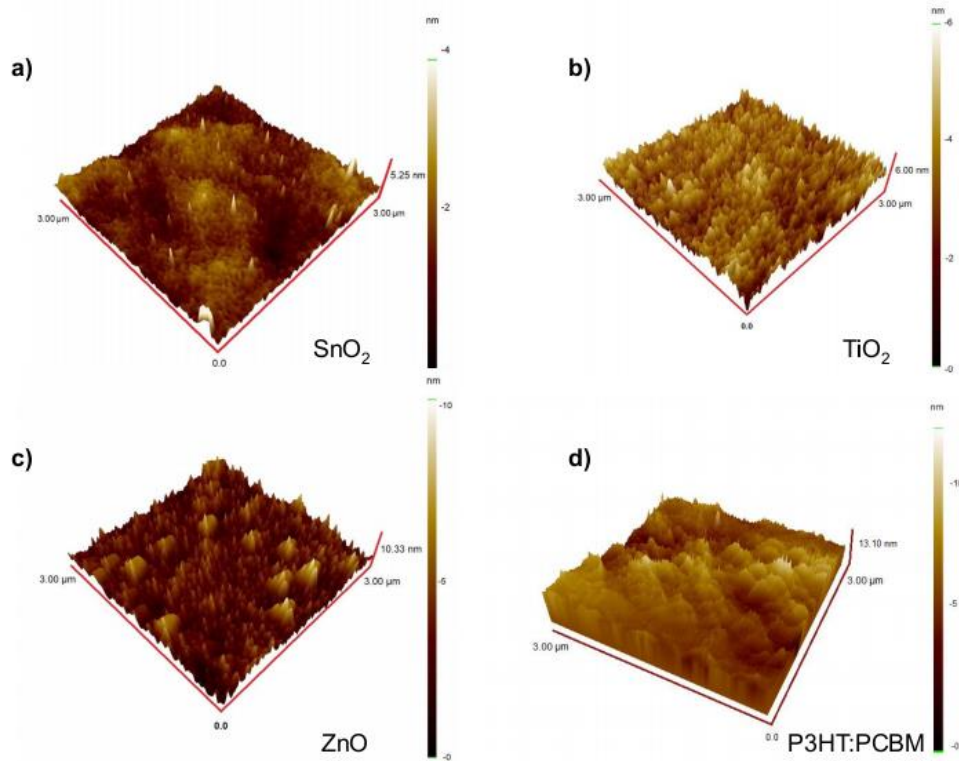
2.1.6 Numunelerin Karakterizasyonu (Characterization of Samples)

Bu çalışmada Cam/FTO/SnO₂, Cam/FTO/TiO₂, Cam/FTO/ZnO ve P3HT:PCBM polimer foto-aktif katmanlarının yüzey morfolojik özellikleri yüksek performanslı Atomik Kuvvet Mikroskopu (NanoMagnetics Instrument, AFM) ile gerçekleştirildi.

Tersine çevrilmiş güneş hücrelerinin çıkış parametreleri ve verimlik değerleri Newport Oriel-Sol1A güneş simülatöründen AM 1.5G (1 Güneş değeri, 0,1 W/cm²) aydınlatması altında Keithley 4200 kaynak cihazlı bir I – V ölçüm sistemi kullanılarak belirlendi.

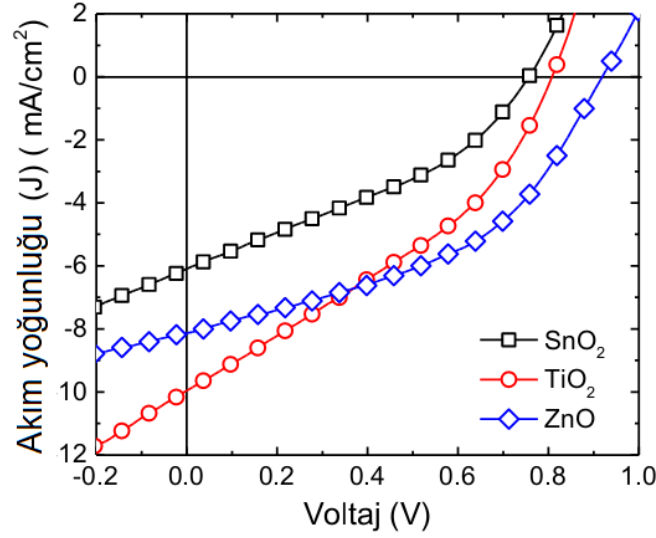
3. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

Bu çalışmada, SnO₂, TiO₂ ve ZnO şeffaf iletken metal oksit yapıları elektron taşıyıcı tabakaları kullanılarak tersine çevrilmiş polimer güneş hücrelerinin üretimi yapıldı ve verimlilik analizleri araştırıldı. Cam/FTO/SnO₂/TiO₂/Polimer, Cam/FTO/TiO₂/Polimer ve Cam/FTO/ZnO/Polimer olmak üzere üç farklı yapıda tersine çevrilmiş polimer güneş hücresi üretildi. Fabrikasyon işlemleri yapılmadan önce polimer güneş hücresini oluşturan katmanların yüzey morfolojileri Atomik Kuvvet Mikroskopi (Atomic Force Microscopy, AFM) kullanılarak analiz edildi. SnO₂, TiO₂, ZnO ve P3HT:PCBM polimer yüzeylerinden elde edilen üç boyutlu (3D) yüzey görüntüleri **Şekil 4**'te verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi, kaplanan tabakaların maksimum pik yüksekliği 5.25 nm ile 13.10 nm arasında değiştiği ölçüldü. **Şekil 4 (a)** ve **Şekil 4 (d)**'den de görüldüğü gibi en düşük yüzey pik değeri 5.25 nm pik yüksekliği ile SnO₂ tabakası için ölçülürken, en yüksek yüzey pik değeri 13.10 nm pik yüksekliği ile P3HT:PCBM polimer katmanı için ölçüldü. Ayrıca, elde edilen AFM görüntüleri ince film tabakalarının ortalama pürüzlülüğünün (average roughness) 0.33 nm ile 0.94 nm arasında değiştiğini göstermektedir. SnO₂, TiO₂ ve ZnO tabakaları için ortalama pürüzlülük değerleri sırayla 0.33 nm, 0.55 nm ve 0.88 nm iken P3HT:PCBM polimer tabakasının ortalama pürüzlülük değerinin 0.94 nm olduğu görüldü.



Şekil 4: Tersine çevrilmiş polimer güneş hücrelerinde metal oksit tabakaları (a) SnO₂, (b) TiO₂, (c) ZnO ve (d) P3HT:PCBM polimer katmanlarının üç boyutlu (3D) Atomik Kuvvet Mikroskopi (AFM) görüntüleri.

Farklı metal oksit tabakaları kullanılarak üretilen tersine çevrilmiş polimer güneş hücrelerinin fotovoltaik performansını değerlendirmek için AM 1.5G aydınlatma altında ve -1.5 V ile + 1.5 V aralığında bias voltajı uygulanarak akım yoğunluğu (current density, J) – voltaj (voltage, V) ölçümleri gerçekleştirildi. Cam/FTO/SnO₂/TiO₂/Polimer/MoO₃/Ag, Cam/FTO/TiO₂/Polimer/MoO₃/Ag ve Cam/FTO/ZnO/Polimer/MoO₃/Ag için elde edilen J -V performans grafikleri **Şekil 5**'te verilmiştir.



Şekil 5: Farklı elektron taşıma tabakalarına sahip tersine çevrilmiş polimer güneş hücrelerinin akım yoğunluğu (J) – voltaj (V) grafiği.

Şekilde verilen J - V grafiği kullanılarak üretilen güneş hücrelerinin fotovoltaiik parametreleri hesaplandı. Güneş hücresi kısa devre olduğunda, yani cihaza uygulanan gerilim sıfır olduğu noktada ($V=0$), maksimum akım sağlanır ve oluşan akım, kısa devre akımı (I_{sc}) olarak adlandırılır. Akım yoğunluğu birim alandan geçen akımın bir ölçüsüdür ve kısa devre akımının, akım yoğunluğu cinsinden karşılığı (J_{sc}), Denklem-1’de verilen eşitlik yardımı ile hesaplanır. Şekil 5’ten de görüldüğü gibi J - V eğrisinin dikey J eksenini kestiği nokta kısa devre akımını (J_{sc}) vermektedir.

$$J_{sc} = \frac{I_{sc}}{A} \quad 1$$

Burada A aktif alan olarak adlandırılır.

Devredeki yükün sıfır olduğu noktada (akımın sıfır olduğu nokta) açık devre gerilimi (open-circuit voltage, V_{oc}) olarak adlandırılır. V_{oc} , açık devre gerilimi, güneş hücresinden sağlanabilen maksimum voltajdır. Bir güneş hücresinden elde edilecek en yüksek verimi belirleyen önemli parametrelerden biri olan dolgu faktörü (fill factor, FF), maksimum gücün ($J_m \cdot V_m$) üretime ($V_{oc} \cdot J_{sc}$) oranıdır ve Denklem-2’de verilen eşitlik yardımı ile hesaplanır [35].

$$FF = \frac{J_m V_m}{J_{sc} V_{oc}} \quad 2$$

Burada kullanılan J_m ve V_m değerleri sırasıyla, hücrede üretilen maksimum akım yoğunluğu ve voltaj değerleridir.

Bir güneş hücresinin en önemli parametresi güç dönüşüm verimliliği (power conversion efficiency, PCE, η) olup çıkıştaki elektrik gücünün girişteki optik güce (P_{in}) oranı olarak tanımlanır. Dolayısıyla, güneş hücresi maksimum güç durumunda çalışırken dönüşüm verimi

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} \times 100 = \frac{J_m V_m}{P_{in}} \times 100 \quad 3$$

ifadesi ile elde edilir [35]. Farklı elektron taşıma tabakalarına sahip tersine çevrilmiş polimer güneş hücreleri için J - V eğrilerinden **Tablo 1**’de verilen değerler elde edildi.

Tablo 1: Farklı elektron taşıma tabakalarına sahip tersine çevrilmiş polimer güneş hücreleri için J-V ölçümleri kullanılarak hesaplanan fotovolttaik performans parametreleri.

Numune Adı	J_{sc} (mA/cm ²)	V_{oc} (V)	FF(%)	η (%)
SnO ₂ /Polimer	6.1	0.74	35	1.62
TiO ₂ /Polimer	9.9	0.81	35	2.78
ZnO/Polimer	8.1	0.91	44	3.32

Tablo 1'den görüldüğü gibi, metal oksit tabakası kayda değer şekilde fotovolttaik performansı ve parametrelerini etkilemektedir. Üretilen örnekler içerisinde açık devre akımı (J_{sc}) en yüksek olan güneş hücresinin 9.9 mA/cm² değeri ile TiO₂ elektron taşıma tabakasına sahip yapıdaki güneş hücresi olduğu görüldü. Öte yandan, diğer parametrelere ve güç dönüşüm verimliliğine bakıldığında ZnO elektron taşıma tabakasına sahip yapıdaki güneş hücresinin daha yüksek açık devre gerimine (V_{oc} = 0.91 V), dolgu faktörüne (FF = % 44) ve daha yüksek güç dönüşüm verimliliğine (η = % 3.32) değerlerine sahip olduğu görülmektedir.

4. SONUÇ (CONCLUSION)

P3HT:PCBM foto-aktif katmanlı tersine çevrilmiş polimer güneş hücreleri üç farklı elektron taşıyıcı ince film tabakalar kullanılarak başarıyla üretildi. Hücre yapısını oluşturan ince film tabakaların yüzey morfolojisi incelendi ve çalışmada kullanılan ince filmlerin yüzey pürüzlülüğünün 0.33 nm ile 0.94 nm aralığında değiştiği görüldü. Güneş hücrelerinin en önemli parçalarından biri olan ve güneş ışığını emerek elektron-boşluk (electron-hole) ikilisinin oluşmasını sağlayan foto-aktif polimer tabakanın çözelti hazırlama sürecinden başlanarak, kaplama ve kaplama sonrası yapılması gereken işlemler bu alanda çalışmak isteyen araştırmacılara yol göstermesi açısından ayrıntılı bir biçimde anlatıldı. Ayrıca, yüzeyin zamana göre değişim fotoğrafları ile polimer tabakanın kaplama sonrasındaki değişimi gösterildi. Bunlar ile beraber, güneş hücre yapısının diğer katmanları için üretim parametreleri ve teknikleri anlatıldı.

Üretilen tersine çevrilmiş polimer güneş hücrelerinin J-V ölçümleri yapılarak fotovolttaik performansları hesaplandı. Bu çalışmada elde edilen sonuçlara göre SnO₂ kullanılan güneş hücresinin verimliliği % 1.62, TiO₂ katmanı kullanılan güneş hücresinin verimliliği % 2.78 ve ZnO tabakası kullanılan güneş hücresinin verimliliği % 3.32 olarak hesaplandı. Buna göre, elektron taşıma katmanı olarak kullanılan ve optik geçirgenli yüksek metal oksit tabakası için farklı alternatiflerin performansları ölçülerek ideal malzemenin ZnO olabileceği sonucuna varıldı.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışma Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı (Türkiye) tarafından desteklenmiştir. Proje No: 2016K121220.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] A. Pochettino, "Sul comportamento foto-elettrico dell'antracene," *Acad. Lincei Rendus*, vol. 15, pp. 355–363, 1906.
- [2] J. Koenigsberger and K. Schilling, "Über Elektrizitätsleitung in festen Elementen und Verbindungen. I. Minima des Widerstandes, Prüfung auf Elektronenleitung, Anwendung der Dissoziationsformeln," *Ann. Phys.*, vol. 337, no. 6, pp. 179–230, 1910.
- [3] M. Volmer, "Die verschiedenen lichtelektrischen Erscheinungen am Anthracen, ihre Beziehungen zueinander, zur Fluoreszenz und Dianthracenbildung," *Ann. Phys.*, vol. 345, no. 4, pp. 775–796, 1913.
- [4] H. Akamatu, H. Inokuchi, and Y. Matsunaga, "Electrical Conductivity of the Perylene-Bromine Complex," *Nature*, vol. 173, pp. 168–169, 1954.
- [5] C. K. Chiang *et al.*, "Electrical Conductivity in Doped Polyacetylene," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 40, no. 22, pp. 1472–1472, May 1978.
- [6] C. W. Tang, "Two- layer organic photovoltaic cell," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 48, no. 2, pp. 183–185, Jan. 1986.
- [7] C. W. Tang and S. A. VanSlyke, "Organic electroluminescent diodes," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 51, no. 12, pp. 913–915, Sep. 1987.
- [8] H. Kallmann and M. Pope, "Photovoltaic Effect in Organic Crystals," *J. Chem. Phys.*, vol. 30, no. 2, pp. 585–586, Feb. 1959.
- [9] G. A. Chamberlain, "Organic solar cells: A review," *Sol. Cells*, vol. 8, no. 1, pp. 47–83, Feb. 1983.
- [10] NREL, "Best Research - Efficiency Chart <https://www.nrel.gov/pv/assets/pdfs/best-research-cell-efficiencies.20190802.pdf> Access date: 08.23.2019."
- [11] W. Brütting, *Physics of organic semiconductors*. Wiley-VCH, 2005.
- [12] A. M. Bagher, "Introduction to Organic Solar Cells," *Sustain. Energy*, vol. 2, no. 3, pp. 85–90, 2014.
- [13] S. Günes, H. Neugebauer, and N. S. Sariciftci, "Conjugated polymer-based organic solar cells.," *Chem. Rev.*, vol. 107, no. 4, pp. 1324–38, 2007.
- [14] A. Haugeneder *et al.*, "Exciton diffusion and dissociation in conjugated polymer/fullerene blends and heterostructures," *Phys. Rev. B*, vol. 59, no. 23, pp. 15346–15351, 1999.
- [15] J. J. M. Halls, K. Pichler, R. H. Friend, S. C. Moratti, and A. B. Holmes, "Exciton diffusion and dissociation in a poly(p-phenylenevinylene)/C60 heterojunction photovoltaic cell," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 68, no. 22, p. 3120, 1996.
- [16] C. W. Tang, S. a. Vanslyke, and C. H. Chen, "Electroluminescence of doped organic thin films," *J. Appl. Phys.*, vol. 65, no. 9, pp. 3610–3616, 1989.
- [17] C. Richter, D. Lincot, and C. A. Gueymard, Eds., *Solar Energy*. New York: Springer, 2012.
- [18] G. Yu, J. Gao, J. C. Hummelen, and A. J. Heeger, "Polymer photovoltaic cells: enhanced efficiencies via a network of internal donor-acceptor heterojunctions," *Science (80-.)*, vol. 270, pp. 1789–1791, 1995.
- [19] Z. Lin and J. Wang, Eds., *Low-cost Nanomaterials*. Verlag-London: Springer, 2014.
- [20] M. Jørgensen, K. Norrman, and F. C. Krebs, "Stability/degradation of polymer solar cells," *Sol.*

- Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 92, no. 7, pp. 686–714, 2008.
- [21] T. Shirakawa, T. Umeda, Y. Hashimoto, A. Fujii, and K. Yoshino, “Effect of ZnO layer on characteristics of conducting polymer/C 60 photovoltaic cell,” *J. Phys. D. Appl. Phys.*, vol. 37, no. 6, pp. 847–850, 2004.
- [22] Y. Zhou, H. Cheun, W. J. Potscavage, Jr, C. Fuentes-Hernandez, S.-J. Kim, and B. Kippelen, “Inverted organic solar cells with ITO electrodes modified with an ultrathin Al₂O₃ buffer layer deposited by atomic layer deposition,” *J. Mater. Chem.*, vol. 20, no. 29, p. 6189, 2010.
- [23] V.-H. Tran, R. Khan, I.-H. Lee, and S.-H. Lee, “Low-temperature solution-processed ionic liquid modified SnO₂ as an excellent electron transport layer for inverted organic solar cells,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 179, pp. 260–269, Jun. 2018.
- [24] D. Yang, P. Fu, F. Zhang, N. Wang, J. Zhang, and C. Li, “High efficiency inverted polymer solar cells with room-temperature titanium oxide/polyethylenimine films as electron transport layers,” *J. Mater. Chem. A*, vol. 2, no. 41, pp. 17281–17285, Sep. 2014.
- [25] H. Cheun *et al.*, “Oriented Growth of Al₂O₃:ZnO Nanolaminates for Use as Electron-Selective Electrodes in Inverted Polymer Solar Cells,” *Adv. Funct. Mater.*, vol. 22, no. 7, pp. 1531–1538, Apr. 2012.
- [26] H.-M. Lee, Y.-J. Noh, S.-I. Na, K.-B. Chung, and H.-K. Kim, “PEDOT:PSS-free organic solar cells fabricated on buffer and anode integrated Ta-doped In₂O₃ films,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 125, pp. 145–154, Jun. 2014.
- [27] S. Temel, M. Nebi, and D. Peker, “Sol- Gel Döndürerek Kaplama Tekniği ile Saydam İletken ZnO İnce Filmlerin Üretilmesi ve Karakterizasyonu,” *GU J Sci, Part C*, vol. 5, no. 3, pp. 51–59, 2017.
- [28] I. D. Parker, “Carrier tunneling and device characteristics in polymer light- emitting diodes,” *J. Appl. Phys.*, vol. 75, no. 3, pp. 1656–1666, Feb. 1994.
- [29] M. G. Helander *et al.*, “Work function of fluorine doped tin oxide,” *Artic. J. Vac. Sci. Technol. A Vac. Surfaces Film.*, 2011.
- [30] M. Kaleli, D. A. Aldemir, A. B. Bayram, and C. A. Yavru, “Ultrasonik Sprey Piroliz ile Üretilen Flor Katkılı Kalay Oksit İnce Filmlerin Yapısal, Morfolojik, Optiksel ve Elektriksel Analizleri,” *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknol. Derg.*, vol. 7, no. 3, pp. 2107–2115, Jul. 2019.
- [31] M. Al-ibrahim, S. Sensfuss, and J. Uziel, “Comparison of normal and inverse poly (3-hexylthiophene) fullerene solar cell architectures,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 85, pp. 277–283, 2005.
- [32] D. Fichou, *Handbook of Oligo- and Polythiophene*. New York: Wiley, 1999.
- [33] J. Li, F. Dierschke, J. Wu, A. C. Grimsdale, and K. Müllen, “Poly(2,7-carbazole) and perylene tetracarboxydiimide: a promising donor/acceptor pair for polymer solar cells,” *J. Mater. Chem.*, vol. 16, no. 1, pp. 96–100, 2006.
- [34] R. Kroon, M. Lenes, J. C. Hummelen, P. W. M. Blom, and B. de Boer, “Small Bandgap Polymers for Organic Solar Cells (Polymer Material Development in the Last 5 Years),” *Polym. Rev.*, vol. 48, no. 3, pp. 531–582, Aug. 2008.
- [35] J. Nelson, *The Physics of Solar Cells*. London: Imperial College Press, 2003.

The Investigation Of Mechanical Properties And Welding With Flash Butt Welding Of AISI 1050, 304 And 430 Types Steels

 Uğur ARABACI^{1,*} , Muhammet Yaşar ÇİMEN²
¹ Gazi University Faculty of Technology, Department of Metallurgical and Materials Engineering, ,06500, Yenimahalle / ANKARA

² Gazi University Faculty of Technical Education, Metal Education Department, 06500, Yenimahalle, Ankara.

Graphical/Tabular Abstract

In this study, AISI 304, AISI 430 stainless steel AISI type 1050 steel butt welding has been applied and its effects on the microstructure and mechanical properties of these materials were investigated application. The combined stiffness of the specimen, tensile strength, and are compared with each other microstructural features have been examined. Flash-butt welding parameters are kept constant during the test run.

Article Info:

Research article

Received: 25/07/2019

Revision 16/10/2019

Accepted: 09/11/2019

Highlights

 Stainless steels
 Flash butt welding,
 Mechanical properties,

Keywords

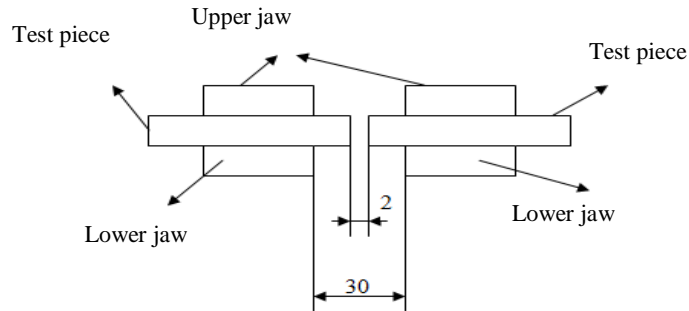
 Stainless steels
 Flash butt welding,
 Mechanical properties,


Figure A. Fixturing the samples to the jaw.

Purpose: In this study, AISI 304, AISI 430 and AISI 1050 materials were matched with themselves and each other and weld test samples were determined. The results of the study are intended to contain data to guide manufacturers welding stainless steels and AISI 1050 steel using the burnt butt welding method.

Theory and Methods: The materials AISI 304, AISI 430 and AISI 1050 were welded by using the fixed parameters. Then, the hardness, tensile strength and microstructure properties of the boiled samples were examined and test results, discussions and comparisons of all samples were made.


Results: As a result of all the microstructure, hardness and tensile results obtained from the experiments, it was found that the welding ability of the materials was effective and high tensile strength was obtained especially in all joints made with AISI 1050 type steel. While the tensile strengths of stainless steels were close to each other in the joints made with each other, the lowest tensile strength was obtained in 304-304 sample.

Conclusion: In particular, austenitic stainless steels have 3 times lower heat conductivity than carbon steels, so it is highly probable that these results will be encountered in the welding zone. In addition to this feature, the thermal expansion coefficient of austenitic stainless steels is about 50% higher than that of carbon steels, which limits welding. The negative effects of these properties were also observed in this study and caused us to obtain low results especially in tensile strength test.

It can be said that the chemical structure of steel is effective on the results obtained in the joining with ferritic type 430. Especially due to the high content of chromium and small amount of carbon, higher mechanical properties were obtained by the absence of martensite in the structure after welding and the possible difficulties in ITAB. In addition, due to the ferrite and carbides in their structure, they cannot be hardened by rapid cooling after welding.



AISI 1050, 304 Ve 430 Tip Çeliklerin Yakma Alın Kaynak Yöntemiyle Kaynatılması ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi

Uğur ARABACI^{1,*} , Muhammet Yaşar ÇİMEN²

¹Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 06500, Yenimahalle / ANKARA

²Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi, Metal Eğitimi, 06500, Yenimahalle, Ankara.

Öz

Bu çalışmada, AISI 304, AISI 430 paslanmaz çelikleri ile AISI 1050 tip çeliğe yakma alın kaynağı uygulanmış ve bu uygulamanın malzemelerin mekanik ve mikroyapı özellikleri üzerine etkileri araştırılmıştır. Birleştirilen numunelerin sertlikleri, çekme mukavemetleri ve mikroyapı özellikleri incelenerek birbirleri ile mukayeseleri yapılmıştır. Deney çalışmaları esnasında yakma alın kaynak parametreleri sabit tutulmuştur. Bu çalışmada elde edilen sonuçların, yakma alın kaynak yöntemini kullanarak AISI 304, AISI 430 paslanmaz çeliklerin ve AISI 1050 çeliğinin kaynağını yapan imalatçıların kullanabileceği verilerin tespitleri amaçlanmıştır. Araştırma sonunda AISI 304 ve AISI 1050 malzemelerinin en yüksek sertlik değerleri kaynak bölgesinde (ITAB) görülürken, AISI 430 paslanmaz çeliğinin sertlik değerlerinin kaynak çiftlerinde düşüşler yaşadığı tespit edilmiştir. AISI 1050 malzemesinin kaynak edildiği numune çiftlerinde sertlik değerlerini ve çekme mukavemetini artırdığı görülmüştür.

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi

Başvuru: 25/07/2019

Düzeltilme: 16/10/2019

Kabul: 09/11/2019

Anahtar Kelimeler

Paslanmaz Çelik

Yakma Alın Kaynağı

Mekanik Özellikler

AISI 430 Çeliği

AISI 304 Çeliği

AISI 1050 Çeliği

The Investigation Of Mechanical Properties And Welding With Flash Butt Welding Of AISI 1050, 304 And 430 Types Steels

Keywords

Stainless steels

Flash butt welding,

Mechanical properties,

AISI 430,

AISI 304

AISI 1050

Abstract

In this study, AISI 304, AISI 430 stainless steel AISI type 1050 steel butt welding has been applied and its effects on the microstructure and mechanical properties of these materials were investigated application. The combined stiffness of the specimen, tensile strength, and are compared with each other microstructural features have been examined. Flash-butt welding parameters are kept constant during the test run. The results obtained in this study, using the flash-butt welding AISI 304, AISI 430 and AISI stainless steel are intended to identify the source of data for use by manufacturers, who in 1050 steel. Research at the end of AISI 304 and AISI 1050 material resources in the high hardness values (HAZ), while sources in AISI 430 stainless steel hardness have been found to experience a decline. AIA was found that the stiffness values of duplicate samples where the material source 1050, and improve the tensile strength.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüz endüstrisinde kullanılan malzeme çeşitlerinin artması farklı özellikler gerektiren yerlerde farklı metal bağlantılarının gerekliliği ve özellikle son yıllarda ekonomik faktörlerin giderek önem kazanması farklı özelliklere sahip malzemelerin birbirleriyle birleştirilmesi zorunluluğunu doğurmaktadır [1,2]. Böylece farklı metallerin kaynakla birleştirilmesi ile o malzemelerin çok özel özelliklerinden birlikte yararlanılmaktadır [3]. Endüstride çok yaygın olarak uygulama alanı bulan paslanmaz çelikler, değişik kaynak yöntemleri ile kaynak edilebilirler ancak paslanmaz çeliklerde farklı bileşimlerin, mekanik ve fiziksel özellikleri etkilemesi, kaynak kabiliyeti açısından kaynak problemlerini de beraberinde getirmektedir. Bu problemler, oluşturulacak yapıların servis ömrü açısından da önem taşırlar [4].

Farklı bileşimdeki malzemelerin birleştirilmesinde, eğer boyutları ve şekilleri müsaade ediyor ise ergitme kaynağına nazaran bir ergitme olayının olmaması ya da sınırlı olması, çok daha az kaynak hatası içermesi ve kaynak sonrası iç gerilmelere sahip olması nedeniyle katı hal kaynak yöntemleri büyük bir üstünlük

göstermektedir [5]. Bu nedenle yakma alın kaynağı günümüzde farklı takım çeliklerinin birleştirilmesinde en ideal kaynak yöntemi olarak karşımıza çıkmaktadır [6].

Yakma alın kaynak yöntemi, ısı, dövme ve yığma işlemlerinden oluşur [7-8]. Metallerin elektriğe karşı gösterdikleri omik ve temas dirençlerinden dolayı oluşan ısı sebebiyle yüzeylerin ergime durumuna gelmesi, daha sonra mekanik ve hidrolik sistemler yardımıyla uygulanan yığma ve dövme sonucu oluşan kaynağa yakma alın kaynağı denir [9-10]. Yakma alın kaynağı, bitişik alın yüzeyinin tüm alanını kapsayan bir direnç basınç kaynağı yöntemidir. Bu yöntem, en ilkel kaynak yöntemi olan demirci kaynağının modernize olmuş şeklidir [11].

Bu çalışmada, AISI 304, AISI 430 ve AISI 1050 malzemeleri hem kendileriyle hem de birbirleriyle eşleştirilerek kaynak test numuneleri belirlenmiştir. Bu kaynak numuneleri, yakma alın kaynağı yöntemiyle sabit kaynak parametreleri altında kaynaklanarak, mikroyapı özellikleri, sertlik ve çekme deney sonuçları elde edilip karşılaştırmalı değerlendirmeleri yapılmıştır. Çalışmada elde edilen sonuçların, yakma alın kaynak yöntemini kullanarak paslanmaz çeliklerin ve AISI 1050 çeliğinin kaynağını yapan imalatçılara kılavuzluk edecek veriler içermesi amaçlanmıştır.

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR (EXPERIMENTAL STUDIES)

Bu çalışmada, AISI 304 kalite östenitik ve AISI 430 kalite ferritik paslanmaz çelikler ile AISI 1050 tip çelik malzemesi, Tablo 4’de verilen kaynak parametreleri kullanılarak yakma alın kaynak yöntemiyle birleştirilip, birleştirilen numunelerin sertlikleri, çekme mukavemetleri ve mikroyapı özellikleri incelenerek birbirleri ile mukayeseleri yapılmıştır.

2.1. Malzeme (Material)

Çalışmalarda kullanılan malzemelerinin kimyasal bileşimleri, Tablo 1’de (AISI 430), Tablo 2’de (AISI 304) ve Tablo 3’de (AISI 1050) verilmiştir.

Tablo 1. AISI 430 paslanmaz çeliğine ait (%) kimyasal bileşim

Malzeme	(%) Kimyasal Bileşim						
AISI 430	C	Mn	Si	Cr	S	P	Fe
	0,12	1,00	0,905	17,801	0,03	0,04	80,104

Tablo 2. AISI 304 paslanmaz çeliğine ait (%) kimyasal bileşim

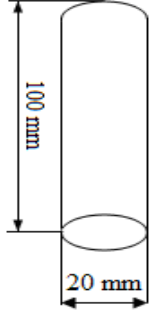
Malzeme	(%) Kimyasal Bileşim							
AISI 304	C	Cr	Si	Mn	Ni	Fe	P	S
	0,08	19,404	0,95	1,904	8,298	69,299	0,040	0,025

Tablo 3. AISI 1050 çeliğine ait (%) kimyasal bileşim

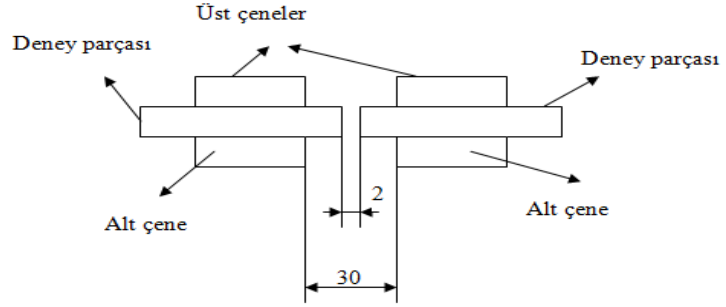
Malzeme	(%) Kimyasal Bileşim						
AISI 1050	C	P	Si	S	Mn	Cr	Ni
	0,55	0,04	0,319	0,04	0,801	0,12	0,018
	Nb	Ti	Fe	-	-	-	-
	0,004	0,003	98,105	-	-	-	-

2.2. Materyal ve Yöntem (Material and Methods)

Numuneler Şekil 1’de gösterildiği ölçülerde hazırlanarak, kaynak makinesine Şekil 2’de gösterildiği şekilde bağlanarak, Tablo 4’te verilen parametreler altında birleştirme işlemleri yapılmıştır.



Şekil 1. Kaynak numunesinin ölçüleri



Şekil 2. Numunelerin çeneyle bağlanması

Tablo 4. Çalışmada kullanılan kaynak parametreleri

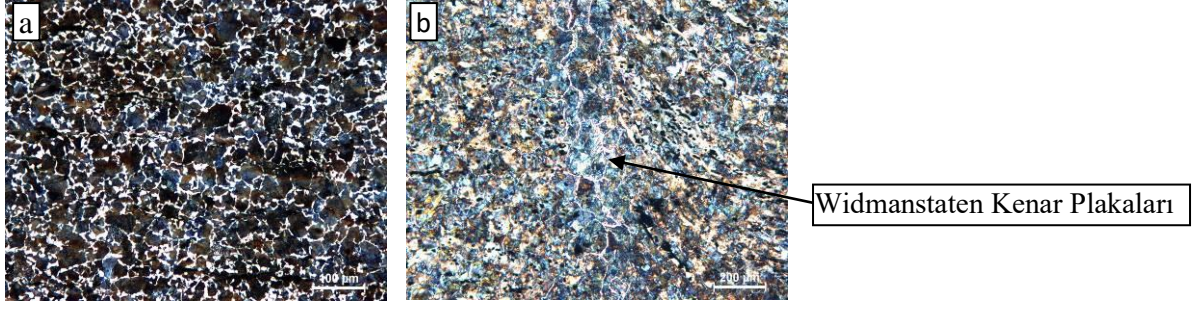
Malzeme (AISI)	Ön ısıtma (sn)	Gerilim (V)	Vuruş Basıncı (Bar)	Yığma Basıncı (Bar)	Çene sıkma basıncı (Bar)	Yığma Akım Zamanı (sn)	Numune Sayısı
304 - 304	2	20	2	6	2,5	2	5
304 - 430							
430 - 430							
304 - 1050							
430 - 1050							
1050 -1050							

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

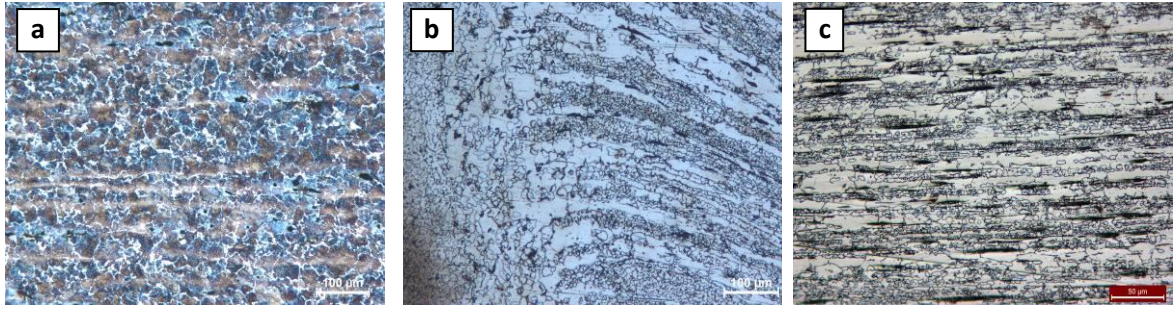
AISI 304, AISI 430 ve AISI 1050 malzemeleri sabit parametreler kullanılarak yakma alın kaynağı yöntemiyle kaynatılmış, kaynatılan numunelerin sertlikleri, çekme mukavemetleri ve mikroyapı özellikleri incelenmiş, bütün numunelere ait deney sonuçları, tartışmaları ve mukayeseleri yapılmıştır.

3.1. Mikro Yapı Sonuçları (Micro Structure Results)

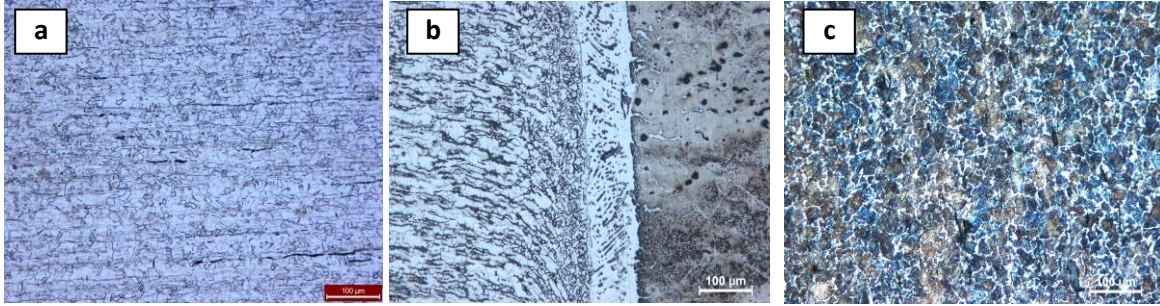
Deney numuneleri gerekli zımparalama ve parlatma işlemlerinden sonra dağlama işlemine tabi tutulmuşlardır. Kaynak numune çiftlerinin AISI 1050 kısımları %2 Nital dağlayıcı ile 2 sn süresince cam beher içerisinde elde dağlanıp, AISI 304 ve AISI 430 kısımları ise 10 gr Oxcalid asit + 100 ml H₂O ile karıştırılarak elde edilen dağlayıcıda elektrolitik dağlama yöntemiyle dağlanmıştır. Elektrolitik dağlama cihazında numuneler, 15 V, 1,6 A kullanılarak 175 sn boyunca dağlanmıştır. Elde edilen görüntüler Şekil 3-8 arasında verilmiştir.



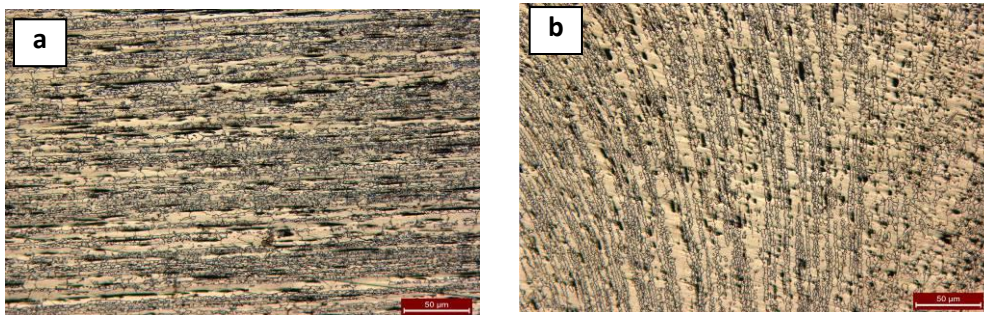
Şekil 3. AISI 1050 - AISI 1050 numunesine ait mikroyapı resimleri (a) AISI 1050 ana malzemesi, (b) kaynak ara yüzeyi ve ITAB.



Şekil 4. AISI 1050 - AISI 304 numunesine ait mikroyapı resimleri (a) AISI 1050 ana malzemesi, (b) kaynak ara yüzeyi ve ITAB (c) AISI 304 ana malzemesi.



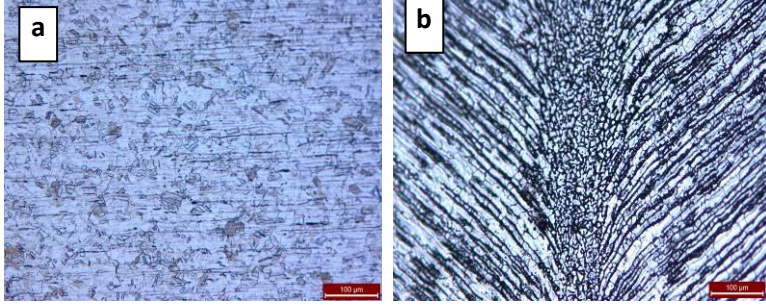
Şekil 5. AISI 1050 - AISI 430 numunesine ait mikroyapı resimleri (a) AISI 430 ana malzemesi, (b) kaynak ara yüzeyi ve ITAB (c) AISI 1050 ana malzemesi.



Şekil 6. AISI 304 - AISI 304 numunesine ait mikroyapı resimleri (a) AISI 304 ana malzemesi, (b) kaynak ara yüzeyi ve ITAB.



Şekil 7. AISI 430 - AISI 304 numunesine ait mikroyapı resimleri (a) AISI 430 ana malzemesi, (b) kaynak ara yüzeyi ve ITAB (c) AISI 304 ana malzemesi.



Şekil 8. AISI 430- AISI 430 numunesine ait mikroyapı resimleri (a) AISI 430 ana malzemesi, (b) kaynak ara yüzeyi ve ITAB.

AISI 1050 - AISI 1050 (Şekil 3) çelik malzemelerinin birleşmelerine ait mikroyapı resimleri incelendiğinde ana malzemede (a), tipik homojen dağılmış perlitik yapıdan söz edilebilir. Birleşme bölgesine ait resim (b) incelendiğinde ise birleşme hattında widmanstatten kenar plakaların az miktarda varlığı görülmektedir. Ayrıca birleşme bölgesinde diğer numunelere göre belirgin bir yönlenme görülmemektedir.

AISI 304 malzemesinin AISI 1050 ile yaptığı kaynaklı birleştirmeye ait mikroyapı resimleri incelendiğinde (Şekil 4) AISI 1050 tarafında hızlı soğumaya bağlı izotermal dönüşüm sonucu beynitik yapılara benzer yapılardan söz edilebilir. Sertlik sonuçlarında bu bölgelerde alınan ortalama 300 HV₅'lik değerlerde bu yapıların varlığını belirler. AISI 304 tarafında ise birleşme bölgesinde yönlenmenin net bir şekilde olduğu, birleşme bölgesinin bitiminde tane irileşmesinin oluştuğunu, ana malzeme tarafına geçildikçe tanelerin incelendiğinden ve bantlaşmanın varlığından söz edebiliriz.

AISI 430 ferritik çelik malzemenin AISI 1050 ile birleştirilmesi sonucu oluşan mikroyapı resimleri incelendiğinde (Şekil 5), AISI 430 ana malzeme tarafında daha iri taneler mevcuttur. Birleştirilen malzemelerin farklı ergime dereceleri ve yine farklı elektrik ve ısı iletkenliklerinden dolayı birleşme bölgesinde AISI 430 tarafında bir yönlenme ve tane incelmeleri görülmektedir.

AISI 304 - AISI 304 deney çiftinin birleştirilmesine ait mikroyapı resimleri incelendiğinde (Şekil 6), birleşme bölgesinde uygulanan basınçla yönlenmenin olduğu görülmektedir. Bu bölgede yeni oluşan tanelerle birlikte, ana malzemedeki bantlaşma eğilimindeki incelmeli tanelerin ortadan kalktığı açıkça anlaşılmaktadır. Resimde görüldüğü gibi widmanstatten kenar levhalara benzer tane sınırlarından tane içlerine doğru büyümelerin olduğu görülmüştür.

AISI 430 - AISI 304 deney çiftine ait mikroyapı resimleri incelendiğinde (Şekil 7), AISI 304 tarafında birleşme hattının hemen yanında ergime olmadığı, yüksek sıcaklığa bağlı aşırı tane büyümesinin olduğu görülmektedir. AISI 430 tarafında ise ana malzemede bantlaşmış ince tanelerin olmadığı gözlenmiş ve sıcak plastik olarak akan tanelerin kaynak işlemi sırasında daha hızlı ergidiği düşünülmektedir. İki malzemedeki ergime farklılığından dolayı birleşmenin hat şeklinde olduğu görülmüştür.

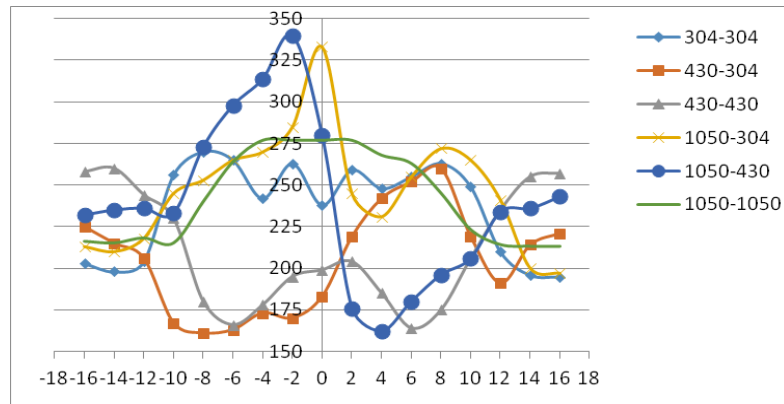
AISI 430 - AISI 430 deney çiftine ait mikroyapı resimleri incelendiğinde (Şekil 8), AISI 430'un sahip olduğu tipik yönlenmiş yapının yanında birleşme hattında yüksek sıcaklığa bağlı aşırı ergimeden dolayı hızlı katılma sonucunda tanelerin incelendiği görülmüştür. Kaynak bölgesinde yine basınç ve ergimeye bağlı fişkırmaların varlığı etkilidir.

3.2. Sertlik Sonuçları (Hardness Results)

Yüzey kalitesi oluşturulan test numuneleri üzerinde boydan boya çizgisel bir hat belirlenip, belirlenen bu hat üzerinde 1 mm aralıklarla sertlik ölçümleri yapılmıştır. Sertlik ölçümleri için HV₅ sertlik ölçüm test metodu kullanılmıştır. Tablo 5’de ki veriler ışığında Şekil 9’da ki sertlik grafiği elde edilmiştir.

Tablo 5. Numunelere ait sertlik değerleri Tablosu.

Mesafe	304-304	430-304	430-430	1050-304	1050-430	1050-1050	
-16	218	240	246	213	221	216	
-14	211	236	242	210	225	215	
-12	204	233	240	218	230	218	
ITAB	-10	256	167	234	245	233	215
	-8	270	161	180	253	273	240
	-6	265	163	166	265	298	264
	-4	242	173	178	270	314	277
	-2	263	170	195	285	340	277
	0	238	183	199	333	280	277
	2	259	219	204	245	176	277
	4	248	242	185	231	162	268
	6	255	252	164	255	180	263
	8	263	260	175	272	196	245
10	249	219	225	265	206	223	
12	210	200	235	221	234	214	
14	208	214	250	210	240	213	
16	206	221	252	200	248	213	



Şekil 9. Numunelere ait sertlik grafiği

Şekil 9’de verilen tüm numunelere ait sertlik grafiğinde; AISI 1050 - AISI 1050 numunesine ait sertlik eğrisinde ana malzemeden, kaynak metaline (0 noktası) doğru gidildikçe sertlik değerlerinin arttığı, merkezde en yüksek sertliğin elde edildiği tespit edilmiştir.

AISI 1050 - AISI 304 sertlik eğrisinde, AISI 304’de daha düşük değerler elde edilirken, kaynak merkezine doğru ilerledikçe sertliğin ITAB’da bir miktar artarken, iri taneli bölgede düştüğü gözlenmiştir. İnce taneli bölgede ise sertlik değerleri yükselmeye başlamış, kaynak merkezinde en yüksek değerlere ulaşılmıştır. AISI 1050 tarafında ise klasik sertlik eğrisi elde edilmiştir.

AISI 1050 - AISI 430 sertlik eğrisinde, AISI 1050 ana malzemesinden kaynak merkezine doğru gidildikçe sertlikte artışlar meydana geldiği ve kaynak merkezinde biraz düşüş gösterdiği tespit edilmiştir. AISI 430 tarafında ise özellikle ITAB'da ince taneli bölgede büyük sertlik düşüşlerinin olduğu ve yine merkezde en yüksek sertlik değerlerinin elde edildiği görülmüştür.

AISI 304 - AISI 304 paslanmaz çelik çiftinde elde edilen sertlik eğrisinde (Şekil 9) ana malzemeden merkeze doğru sertlik artarken, sertlik farkı diğer grafiklere göre çok büyük fark göstermemektedir. Birleşme çizgisinde (0 NOKTASI) yüksek ergimeye bağlı bir sertlik düşüşü görülmüştür. Burada en yüksek sıcaklık olduğunda, toparlanma ve yeniden kristalleşmenin bu bölgede daha etkili olduğu ve deformasyonun etkilerini azalttığı düşünülmektedir.

Şekil 9'de verilen sertlik grafiği incelendiğinde, AISI 430 - AISI 304 deney çiftinin kaynağında ana malzemede çok büyük sertlik farkı bulunmazken, iri taneli bölge için AISI 304 tarafında sertlik yükselmesi, AISI 430 tarafında ise böyle bir sertlik artışının olmadığı görülmüştür. Birleşme bölgesinde ise düşük sertliğin elde edildiği tespit edilmiştir.

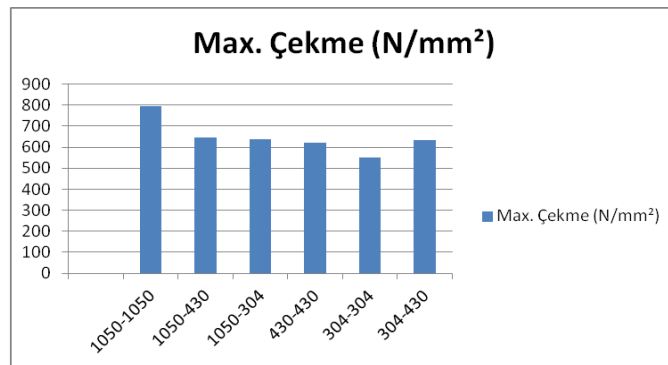
Aynı paslanmaz çelik çiftine ait grafikte (Şekil 9) diğer AISI 430 malzemesinde elde edilen grafiklerde olduğu gibi ana malzemeden kaynak merkezine ilerledikçe sertliklerde düşüşler olduğu tespit edilmiştir. Kaynak merkezinde bir miktar yükselse de bu değer ana malzemedeki değere erişmediği görülmüştür.

3.3. Çekme Sonuçları (Pull Results)

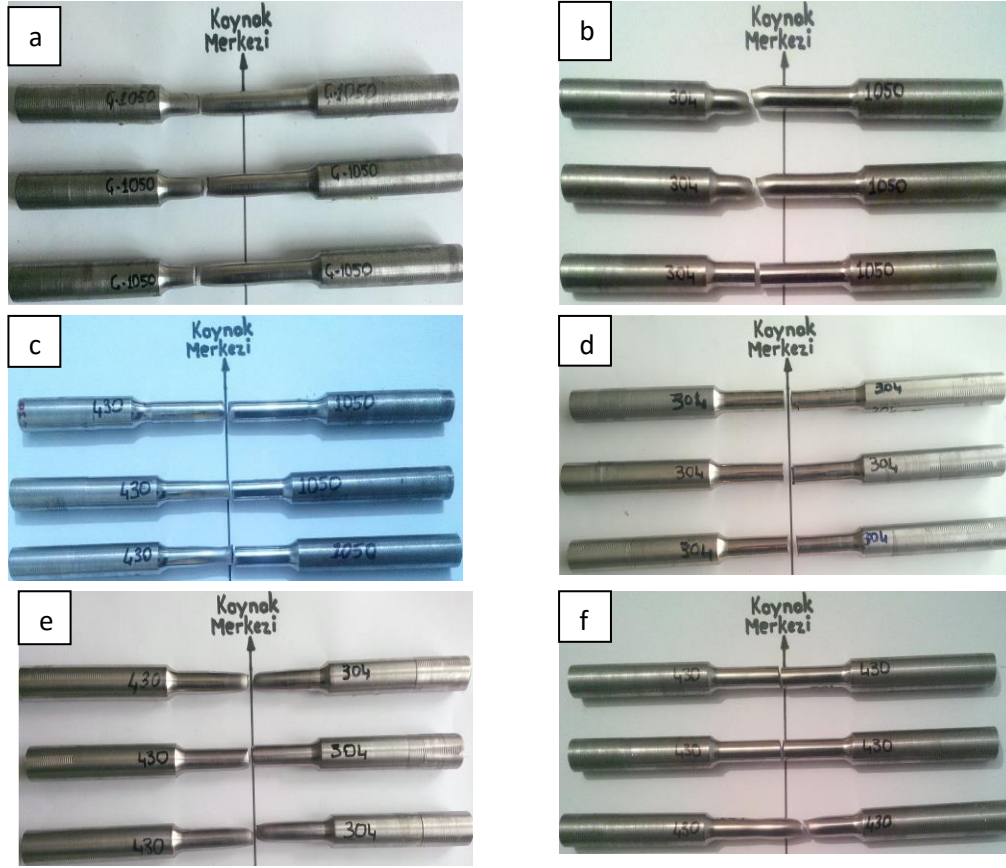
Numunelere uygulanan çekme testi sonuçları incelendiğinde Tablo 6'daki sonuçlar elde edilmiş ve bu sonuçlara bağlı olarak ta Şekil 10'da verilen çekme grafiği elde edilmiştir. Aynı zamanda 1050, 304 ve 430 çeliklerinin saf hallerine ait çekme değerleri de Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 6. Test numunelerinin kaynak parametreleri ve çekme deney sonuçları

Numune adı (AISI)	Max. Çekme (N/mm ²)	Lo (mm)	Yer değiştirme (mm)
1050-1050	796	60	7,21
1050-430	648	60	5,65
1050-304	637	60	3,23
304-430	632	60	7,37
430-430	623	60	4,26
304-304	551	60	1,98
1050	590-800		
304	515-720		
430	520		



Şekil 10. Numunelere ait maksimum çekme grafiği.



Şekil 11. Çekme numunelerinin kopma bölgeleri. (a) AISI 1050 - AISI 1050, (b) AISI 1050 - AISI 304, (c) AISI 1050 - AISI 430, (d) AISI 304 - AISI 304, (e) AISI 430 - AISI 304, (f) AISI 430 - AISI 430.

Tablo 6'ya bağlı maksimum çekme grafiği incelendiğinde (Şekil 10) en yüksek çekme kuvvetine 1050-1050 çelik çiftinin, en düşük çekme dayanımına ise 304-304 çelik çiftinin sahip olduğu görülmüştür. Çelik çiftleri için ayrı ayrı değerlendirme yaptığımızda ise şu sonuçlara varılmıştır.

AISI 1050 -1050 tip çelik çiftinin en yüksek çekme dayanımına sahip olmasının sebebi olarak malzemenin sahip olduğu kimyasal ve mekanik özellikler ile malzemelerin kaynak yöntemlerine olan uygunluğundan kaynaklandığı düşünülmektedir. Uygulanan kaynak işlemi ile birlikte AISI 1050 tane yapısının sünekleştiği, çekme dayanımının arttığı, aynı zamanda en yüksek % uzama miktarına sahip deney gruplarından biri olduğu görülmektedir.

Şekil 10'de verilen maksimum çekme grafiği ve Tablo incelendiğinde, AISI 304-AISI 1050 tip çelik çiftinde çekme mukavemetinin 637 N/mm^2 görülmektedir. Çekme dayanımının daha düşük çıkmasının, malzemelerin sahip oldukları farklı ergime dereceleri, tane yapıları ve mekanik özelliklerinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Şekil 10'de verilen çekme deney sonuçları incelendiğinde, çekme mukavemetinin 648 N/mm^2 olduğu görülmektedir. AISI 430 paslanmaz çelik ile AISI 1050 tip çelik çiftinde çekme dayanımının düşük çıkmasının yine, malzemelerin farklı ergime dereceleri, tane yapıları ve mekanik özelliklerinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Şekil 10'da verilen çekme deney sonuçları incelendiğinde, çekme mukavemetinin 551 N/mm^2 olduğu görülmektedir. En düşük çekme dayanımı AISI 304 - AISI 304 tipi paslanmaz çelik çiftinde tespit edilmiştir. Çekme dayanımının düşük olmasında mikro yapı fotoğraflarında da görülen topaksı ve ideomorf yapının etkili olduğu düşünülmektedir. Bu topaksı ve ideomorf yapının mekanik özellikleri düşürdüğü bilinmektedir.

Şekil 10'da verilen çekme deney sonuçları incelendiğinde, çekme mukavemetinin 632 N/mm^2 olduğu görülmektedir. AISI 430 ve AISI 304 tipi paslanmaz çeliklerinin birbirleri ve kendileriyle yapılan birleştirmelerde oluşan krom karbürlerin çekme dayanımlarını düşürdüğü düşünülmektedir.

Şekil 10'da verilen çekme deney sonuçları incelendiğinde, çekme mukavemetinin 623 N/mm^2 olduğu görülmektedir. AISI 430 - AISI 430 tipi paslanmaz çeliklerinin birleştirmelerinde oluşan krom karbürlerin çekme dayanımını düşürdüğü düşünülmektedir.

Tüm çekme testi deney numunelerinin kopma bölgeleri incelendiğinde; AISI 1050 - AISI 1050 deney çiftlerinde kopmaların ana malzemelerde olduğu, uzamaların ise büyük oranda kopma bölgelerinde gerçekleştiği görülmüş ve % 14,4 uzama değeri ile (%) uzamanın en fazla olduğu çelik çiftlerinden birisi olduğu tespit edilmiştir.

AISI 1050 - AISI 304 çelik çiftlerinde kopmaların tamamının AISI 304 ana malzemesi tarafında gerçekleştiği görülmüştür. Bu çelik çiftindeki uzama değerinin ise % 6,46 olduğu görülmektedir.

AISI 1050 - AISI 430 deney çiftlerinde kopmaların ITAB'da ana malzemeye geçiş bölgesinde olduğu, uzamanın AISI 430 malzemesinde AISI 1050 çeliğine göre daha fazla olduğu görülmüştür.

AISI 304 - AISI 304 deney çiftlerinde kopmaların yine ITAB'da kaynak merkezine yakın bir bölgede gerçekleştiği, ayrıca uzamanın % 3,97 ile en az olduğu çelik çiftinin bu grup olduğu tespit edilmiştir.

AISI 430 - AISI 304 deney çiftlerinde kopmaların 430 tarafında ve ana malzemede olduğu, uzamaların ise AISI 304 malzemelerinde daha fazla olduğu tespit edilmiştir ayrıca uzama değerinin % 14,7 ile kaynak çiftleri içerisinde en yüksek uzama değerine sahip olduğu tespit edilmiştir.

AISI 430 - AISI 430 deney çiftlerinde kopmaların kaynak ara yüzeye çok yakın ITAB'da gerçekleştiği görülmüştür.

4. SONUÇLAR (CONCLUSION)

Yapılan deneyler sonucunda elde edilen tüm mikro yapı, sertlik ve çekme sonuçları değerlendirildiğinde malzemelerin kaynak kabiliyetlerinin etkili olduğu, özellikle AISI 1050 tipi çelik ile yapılan tüm birleştirmelerde yüksek çekme dayanımı elde edildiği tespit edilmiştir. Paslanmaz çeliklerin birbirleri ile yapılan birleştirmelerde birbirlerine yakın çekme dayanımları elde edilirken, en düşük çekme dayanımı 304-304 numunesinde elde edildiği tespit edilmiştir. Bunun sebebi olarak ta yine 304 tipi paslanmaz çeliklerin sahip olduğu kaynak kabiliyeti gösterilebilir. Özellikle östenitik paslanmaz çeliklerin sahip oldukları ısı iletim kabiliyetinin, karbonlu çeliklere göre 3 kat daha düşük olması sonucu kaynak sırasında oluşan ısının daha uzun süre kaynak bölgesinde kalmasıyla bu tür sonuçlarla karşılaşılması yüksek ihtimaldir. Bu özelliğe ilave olarak östenitik paslanmaz çeliklerin sahip olduğu ısıl genleşme katsayısının karbonlu çeliklere oranla yaklaşık %50 oranında fazla olması kaynakta sınırlılıklar getirmektedir. Bu özelliklere bağlı olumsuzluklara bu çalışmamızda da kendini göstermiş ve özellikle çekme dayanımı testinde düşük sonuçlar elde etmemize sebep olmuştur.

Ferritik tip 430 ile yapılan birleştirmelerde elde edilen sonuçlar üzerinde çeliğin sahip olduğu kimyasal yapının etkili olduğu söylenebilir. Özellikle yüksek miktarda Krom ve az miktarda karbon içermelerinden dolayı yapısında kaynak sonrası martenzit oluşmaması ve buna bağlı olarak ta ITAB'da olması muhtemel zorlukların da ortadan kalkmasıyla daha yüksek mekanik özellikler elde edilmiştir. Ayrıca yapılarında bulunan ferrit ve karbürlerden dolayı da kaynak sonrası çabuk soğuma ile de sertleştirilememektedirler.

1. Malzemelerin çekme test sonuçları incelendiğinde en yüksek çekme dayanımına AISI 1050 - AISI 1050, en düşük çekme dayanımına ise AISI 304 - AISI304 çelik çiftinin sahip olduğu tespit edilmiştir. AISI 304- AISI 304 çiftinde mikroyapıda görülen topaksı ve ideomorf yapının çekme dayanımını düşürdüğü düşünülmektedir.
2. Çelik çiftlerinin çekme mukavemetlerinin büyükten küçüğe doğru AISI 1050- AISI 1050, AISI 1050 - AISI 430, AISI 1050 - AISI 304, AISI 430 - AISI 304, AISI 430 - AISI 430 ve AISI 304 - AISI 304 şeklinde sıralandığı görülmüştür.
3. Orta karbonlu çelik olarak kabul edilen AISI 1050 çeliğinin en yüksek çekme mukavemetine sahip olmasının, gerek kimyasal alaşım ve mekanik özelliklerinin üstünlüğü, gerekse sahip olduğu yüksek kaynak edilebilirlik özelliğinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Aynı zamanda benzer yapıdaki malzemelerin birbirleriyle kaynak edilebilirliği daha da yüksek olduğundan ortaya çıkan birleşmenin de mekanik özelliklerinin yüksek olduğu görülmüştür.
4. Farklı malzemelerin birbiriyle yapılan kaynağında, AISI 1050 ile yapılan birleştirmelerin yüksek çekme mukavemetine sahip olduğu görülürken, paslanmaz çelik çiftlerin gerek krom karbür

çökmesine bağlı olarak, gerekse bimetal özelliklerine bağlı olarak daha düşük çekme dayanımları elde ettiği görülmüştür.

5. Çelik çiftlerinin çekme testlerindeki % uzamaları incelendiğinde ise paslanmaz çelik malzemelerde büyük sorun olan krom karbür çökmesinin etkili olduğu düşünülmektedir. Tane sınırlarında meydana gelen krom karbürlerin malzemelerin çekme dayanımlarını düşürdüğü tespit edilmiştir.
6. AISI 304 tipi paslanmaz çelik malzemenin hem kendi hem de diğer çelik tipleriyle kaynaklanması sonucu elde edilen görüntüler incelendiğinde özellikle 304 ana malzemede homojen bir yapıya sahip olmadığı, genellikle hadde yönüne uzamış bantlı tanelerin içerisinde termomekanik etkiye bağlı tane incelmeleri görülmüştür.
7. Çekme numunelerinde kopmalar; AISI 1050 - AISI 430, AISI 430 - AISI 304, AISI 304 - AISI 304 ve AISI 430- AISI 430 deney çiftlerinde ITAB’da, AISI 1050 - AISI 1050 deney çiftlerinde kopmaların tamamı ana malzemelerde gerçekleşmiştir. AISI 1050 – AISI 304 deney çiftlerinde ise AISI 304 tarafında ITAB’da gerçekleşmiştir.
8. AISI 304 ve AISI 1050 malzemelerinin en yüksek sertlik değerleri kaynak bölgesinde (ITAB) görülürken, AISI 430 paslanmaz çeliğinin sertlik değerlerinin kaynak bölgesinde düşüşler yaşadığı tespit edilmiştir.
9. Kaynak merkezinde ölçülen sertlik değerlerinin büyükten küçüğe doğru AISI 1050- AISI 304, AISI 1050 - AISI 430, AISI 1050 - AISI 1050, AISI 304 - AISI 304, AISI 430 - AISI 430, AISI 430 - AISI 304 şeklinde sıralandığı tespit edilmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Asm Metals Handbook. (2001). Paslanmaz Çeliklerin, Takım Malzemelerinin Ve Özel Amaçlı Metallerin Özellikleri Ve Seçimi, 9., 3. Asm International, 617-622.
- [2] Çetinkaya C., Arabacı U, “Flash Butt Welding Application On 16mncr5 Chain Steel And Investigation Of Mechanical Properties”. Journal Of Materials Design, Volume:27, Issue:10, Pages:1187-1195, 2006.
- [3] Arabacı, U., Çetinkaya, C., Akay A., “An Investigation Of Effects Of Upsetting Current Time And Normalization Heat Treatment On Mechanical Properties Of X40crmov51 And C1030 Steels Joined By Flash Butt Welding,” Journal Of Materials Design. Volume 28, Issue 8, 2007, Pages 2351-2360.
- [4] Çetinkaya, C., Arabacı, U., “An Investigation Of Effects Of Upsetting Current Time And Normalization Heat Treatment On Mechanical Properties Of 16mncr5 Chain Steel Joined By Flash Butt Welding.” G. Ü. Müh.-Mim. Fak. Dergisi, Volume:19, Issue:4, Page: 455-465, 2004.
- [5] Çetinkaya, C., Arabacı, U., Akay, Ali., “The Effect Of Upsetting Current Time On Welding Quality Of Welded By Flash Butt Welding Two Different Steels”. G.Ü. Müh.-Mim. Fak. Dergisi. Volume:21, No:3, Page: 519-525, 2006.
- [6] C.W. Ziemian, M.M. Sharma, D.E. Whaley effects Of Flashing And Upset Sequences On Microstructure, Hardness, And Tensile Properties Of Welded Structural Steel Joints Mater. Des., 33 (2012), Pp. 175-184
- [7] D. Nelson, W. Baeslack, J. Lippold characterization Of The Weld Structure İn A Duplex Stainless Steel Using Color Metallography Materials Characterization, 39 (1997), Pp. 467-477
- [8] T. Oshima, Y. Habara, K. Kuroda efforts To Save Nickel İn Austenitic Stainless Steels Isij Int, 47 (2007), Pp. 359-364
- [9] Trompler, Ruben Jr. (1996). Flash Butt Welding Of Crane Rail, Iron And Steel Engineer. Oct., 73, (10), 42-44.
- [10] Anık, S., Anık, E. Sabri., Vural, M. (1988). Kaynak Yöntemleri ve Donanımları, Birsen yayınevi, İstanbul, 30-35.
- [11] Tülbentçi, K., Yılmaz, M. (1990). Yakma Alın Kaynağı. Kaynak Dünyası, Birsen Basımevi, İstanbul, 14-25.

Experimental and Numerical Modeling of Open Channel Flow in Various Cross-Section

 Veysel GÜMÜŞ¹, Oğuz ŞİMŞEK^{2,*}, Şemsettin BAL³
^{1,2,3} Harran University Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, ORCID:0000-0003-2321-9526, 63000, Haliliye/ŞANLIURFA

Graphical/Tabular Abstract

Article Info:

Research article

Received: 17/07/2019

Revision 04/10/2019

Accepted: 09/11/2019

Highlights

- Numerical modeling of the narrowing open channel flow
- Determine of the successful turbulence model in the 3D modeling

Keywords

 Open Channel Flows
 Acoustic Doppler
 Velocimeter
 Various Cross-Section
 Computational Fluid
 Dynamics
 Velocity Field

In this study, the open channel flow, interacts with the trapezoidal structure which forms constitutes the narrowing and expansion in the open channel is investigated experimentally and numerically. In experimental studies, velocity field and free surface profile are measured with acoustic doppler velocimeter (ADV) and limnimeter, respectively. Standard $k-\epsilon$, Renormalization Group $k-\epsilon$, Realizable $k-\epsilon$, Standard $k-\omega$, Shear Stress Transport, Reynolds Stress Model, Detached Eddy Simulation and Large Eddy Simulation models are used to determine the velocity field and free surface profile.

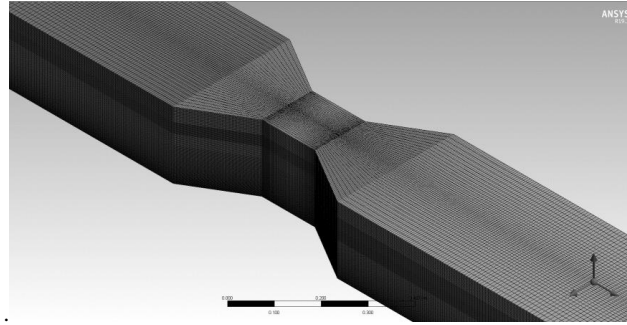


Figure A. Three-dimensional computational grid

Purpose: Fluid–structure interaction problems and multiphysics problems in general are often too complex to solve analytically and so they have to be analyzed by means of experiments or numerical simulation. In this study, the flow that interacts with the trapezoidal head structure, which constitutes the narrowing and expansion section in the open channel, has been investigated experimentally and numerically.

Theory and Methods: In experimental studies, the velocity field and flow profiles are measured using Acoustic Doppler Velocimeter (ADV) and limnimeter, respectively. In numerical modeling, different turbulence closure models have been tested for their success in estimating the velocity field and free surface profile. In the evaluation of the model performance to predict experimental results, Mean Square Error (MSE) and Mean Absolute Relative Error (MARE) parameters are used. Grid Convergence Index (GCI) method is used to determine the mesh density and the Volume of Fluids (VOF) method is used to determine the free surface profile.

Results: As a result of the study, it is determined that DES model is more successful than used other models in determining velocity field and flow profile according to MSE and MARE.

Conclusion: The size of the region where the negative velocity value formed after the contraction zone of the horizontal velocity component (u) value decreases as it moves from the bottom of the channel towards the surface. It was observed that the density of the numerical velocity vectors increased as it progressed from the bottom of the channel towards the free surface. In addition, it is seen from the results obtained that numerical calculation methods can be used successfully in solving such flow problems.



Değişken Enkesitli Açık Kanal Akımının Deneysel ve Sayısal Modellemesi

Veysel GÜMÜŞ¹, Oğuz ŞİMŞEK², Şemsettin BAL³

^{1,2,3}Harran Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 63000, Haliliye/ŞANLIURFA

Öz

Bu çalışmada, açık kanal içerisinde daralma ve genişleme kesiti oluşturan trapez başlıklı yapı ile etkileşimde bulunan akım, deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Deneysel çalışmalarda, hız alanı Akustik Doppler Hız Ölçer (Acoustic Doppler Velocimeter-ADV) ve su yüzü profili ise limnometre yardımıyla ölçülmüştür. Sayısal modellemelerde farklı türbülans kapatma modelleri kullanılarak, bu modellerin akım alanını ve su yüzü profilini tahmin etmedeki başarısı test edilmiştir. Kullanılan modellerin deneysel sonuçları tahmin etme performansları, Ortalama Karesel Hata (OKH) ve Ortalama Mutlak Göreceli Hata (OMGH) parametrelerine göre değerlendirilmiştir. Sayısal model sonuçları üzerinde etkisinin olduğu bilinen hesaplama ağının analizinde Ağ Yakınsama İndeksi (Grid Convergence Index-GCI) yöntemi, serbest su yüzünün belirlenmesinde ise Akışkan Hacimleri Yöntemi (Volume of Fluids-VOF) kullanılmıştır. Çalışma sonucunda, akım hız alanı ve serbest su yüzü profilinin belirlenmesinde elde edilen OKH ve OMGH değerlerine göre, DES modelinin kullanılan diğer modellere kıyasla daha başarılı sonuç verdiği belirlenmiştir.

Experimental and Numerical Modeling of Open Channel Flow in Various Cross-Section

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 17/07/2019
Düzeltilme: 04/10/2019
Kabul: 09/11/2019

Anahtar Kelimeler

Açık Kanal Akımları
Akustik Doppler Hız Ölçer
Değişken Enkesit
Hesaplamalı Akışkanlar
Dinamiği
Hız Alanı

Keywords

Open Channel Flows
Acoustic Doppler
Velocimeter
Various Cross-Section
Computational Fluid
Dynamics
Velocity Field

Abstract

In this study, the flow that interacts with the trapezoidal head structure, which constitutes the narrowing and expansion section in the open channel, has been investigated experimentally and numerically. In experimental studies, the velocity field and flow profiles are measured using Acoustic Doppler Velocimeter (ADV) and limnimeter, respectively. In numerical modeling, different turbulence closure models have been tested for their success in estimating the velocity field and free surface profile. In the evaluation of the model performance to predict experimental results, Mean Square Error (MSE) and Mean Absolute Relative Error (MARE) parameters are used. Grid Convergence Index (GCI) method is used to determine the mesh density and the Volume of Fluids (VOF) method is used to determine the free surface profile. As a result of the study, it is determined that DES model is more successful than used other models in determining velocity field and flow profile according to MSE and MARE.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Akarsu veya açık kanal akımlarının yapı ile etkileşimleri karmaşık bir akım problemi olarak karşımıza çıkmaktadır. Yapı akım etkileşiminin söz konusu olduğu akımlarda yapının akım alanında meydana getirdiği daralma veya genişleme durumları akım alanı, akım karakteristikleri ve akım profili gibi parametrelerde değişikliğe neden olur. Ayrıca, doğal akarsu veya yapay kanallar içerisine çeşitli amaçlar için inşa edilmek zorunda kalınan yapıların etrafındaki akım alanında meydana gelen değişimler, doğal akarsu rejimini değiştirmenin yanı sıra yatak malzemesinin de topolojisini değiştirir. Bu değişimlerden dolayı olumsuzlukların yaşanmaması için, akım alanına yapılmak zorunda olan yapıların geometrik özelliklerinin yanı sıra hidrolik özelliklerinin de bilinmesi gerekmektedir. Ulaşımında kullanılan köprülerin statik ve dinamik projelendirilmesinde hata bulunmamasına rağmen ülkemizde yaşanan köprü yıkılmalarının ya da göçmelerinin en büyük nedeni, yapıya etki eden akımın hidrolik özelliklerinin ve yapı üzerindeki etkilerinin göz ardı edilmesi veya doğru analiz edilmemesinden kaynaklandığı görülmektedir.

Hidrolik yapıların projelendirilme aşamasında, yapının ve akımının statik, dinamik ve hidrolik açıdan projelendirilmesi için laboratuvarlarda deneysel model çalışmalarının yanı sıra, bilgisayar ortamında sayısal model çalışmaları da yapılmaktadır. Ayrıca, yapı ile etkileşimde bulunan akımların hidrolik özelliklerinin teorik olarak belirlenebilmesi için çeşitli ampirik formüller de geliştirilmiştir. Araştırmacılar tarafından yapı akım etkileşimi gibi karmaşık akım problemlerinin sayısal olarak çözümünde kullanılan bazı paket programlar geliştirilmiştir. Sayısal model çalışmaları fiziksel model çalışmalarına kıyasla, daha az zaman ve maliyet gerektirmesi, insan gücüne daha az ihtiyaç duyması ve akım ile ilgili daha fazla bilgiyi daha pratik olarak elde etme imkânı verdiği için büyük avantajlara sahiptir. Bunun yanı sıra, sayısal modeller farklı akım ve/veya yapı koşulları altında tekrar edilmesi gereken analizler içinde oldukça elverişli ve pratiktir. Bu avantajlarından dolayı fiziksel model çalışmalarına kıyasla sayısal model çalışmaları araştırmacılar ve uygulayıcılar tarafından oldukça sık tercih edilmektedir. Ho ve ark. [1], dolusavak üzerinden geçen akımın özelliklerini teorik olarak incelemek amacıyla iki ve üç boyutlu sayısal model çalışmaları gerçekleştirmişlerdir. Sayısal modelin doğrulanması bağlamında hesaplama bulgularını, Warragamba, Hume ve Buffalo Barajlarının dolusavaklarında akım profilleri ile ilgili yaptıkları ölçümlerle karşılaştırmışlar ve karşılaştırma sonucunda sayısal model ve deneysel ölçümlerin uyumlu olduğunu belirtmişlerdir. Daneshkhan ve Vosoughifar [2], çalışmalarında Fluent yazılımı içerisinde bulunan farklı türbülans modellerini kullanarak ogee profilli dolusavak üzerinden geçen akımı sayısal olarak analiz etmişlerdir. Gauss-Seidel yakınsama kriterini esas alarak sayısal çözümlerde zaman adımını 0.01 s olarak belirlemişlerdir. RNG türbülans modeli kullanılarak yapılan sayısal analiz bulguları ile deney bulguları arasındaki göreceli hata yüzdesini 9,687 olarak hesaplamışlardır. Ayrıca, diğer bir sayısal analiz yazılımı olan Flow 3D ile elde edilen bulguların, Fluent sonuçlarıyla ve deneysel bulgularla uyumlu olduğu görülmüştür. Soydan ve ark. [3], tabandan belirli bir mesafe yukarıya yerleştirilmiş silindirik savak ile etkileşimde bulunan açık kanal akımını deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Akımı idare eden denklemleri iki boyutlu olarak RNG, SST ve RSM türbülans kapatma modellerini kullanarak çözmüşler ve sayısal modellemelerde su yüzü profilini belirlemek için VOF yöntemini kullanmışlardır. Lazer Doppler Anemometresi (LDA) kullanarak elde ettikleri deneysel hız profillerini sayısal model sonuçları ile karşılaştırmalarından, RNG türbülans modeli kullanılarak elde edilen sonuçların kullanılan diğer iki modele kıyasla deneysel verilerle daha uyumlu olduğu rapor edilmiştir. Soydan ve ark. [4], köprü ayağı etrafındaki üç boyutlu akımın hız alanını LDA ile ölçmüşler ve aynı akım şartları için temel denklemleri ANSYS-Fluent ile sayısal olarak çözmüşlerdir. Sayısal modellemede, SKE, RNG ve RKE türbülans modellerini ve serbest su yüzü profillerini belirlemede ise VOF yöntemini kullanmışlardır. Sayısal modellemelerde kullanılacak ağ yapısının sayısal sonuçlara olan etkisini incelemek için GCI yönteminden yararlanmışlardır. Çalışma sonucunda, sayısal olarak elde edilen hız alanı ve su yüzü profillerini deneysel ölçümlerle karşılaştırmışlar ve RKE modelinin köprü ayağı etrafındaki akım alanını belirlemede diğer modellere göre daha başarılı olduğunu tespit etmişlerdir. Özmen-Çağatay ve Kocaman [5], mansap bölgesinde ani daralma bulunan kuru kanal üzerinde baraj yıkılması durumunu deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Dikdörtgen, yatay, pürüzsüz ve prizmatik açık kanalda oluşan baraj yıkılması akımının ölçümlerini dijital fotoğraflama tekniği deneysel olarak belirlemişlerdir. RANS tabanlı çözüm yapan k- ϵ türbülans modelini kullanarak gerçekleştirdikleri sayısal modelleme sonuçları ile deneysel verileri karşılaştırmışlar ve bu karşılaştırma neticesinde, sonuçların birbiriyle uyumlu olduğunu belirtmişlerdir. Huang ve ark. [6], 90o birleştirme açısına sahip açık kanal akımının farklı debi durumları için deneysel ve sayısal modellemesi yapmıştır. Farklı akım koşulları altında elde edilen deneysel veriler üç boyutlu sayısal model sonuçlarını doğrulamak için kullanılmıştır. Deneysel ve sayısal sonuçların karşılaştırılmasından, bu tür akım problemlerinde sayısal modelleme sonuçlarının deneysel ölçümler ile oldukça uyumlu olduğu görülmüştür. Daha sonraki çalışmalarda farklı bağlantı tipinin veya açısının değişmesi durumunda da sayısal modelin güvenle kullanılabileceği ifade edilmiştir. Bell ve ark. [7], bir baraj yıkılmasından sonra oluşan akımın düz ve kavisli kanallarda düzensiz akışlar için geçici rezervuar derinliklerinde elde edilen deneysel veriler elde etmişlerdir. Su seviyesi değişimi, mansap kanalındaki beş istasyonda ve rezervuardaki altı yerde, dalga cephelerinin plan görüntüleri mansap kanalındaki üç istasyonda kaydedilmiştir. Dalgaların video görüntüleri gölgeleme yoğunluklarına göre elektronik olarak dijital bilgilere çevrilmiştir. Ölçümler, memba rezervuar derinliğini, kanal derinliğini ve kanal pürüzlülüğünü değiştirerek çok çeşitli başlangıç koşulları için gerçekleştirilmiştir. Aköz ve ark. [8], tabana farklı kısmi oranlarda gömülmüş silindir üzerinden geçen akımı farklı Reynold sayıları için sayısal olarak modellemişlerdir. Sayısal çözümlemede SKE, RNG, RKE, SST, Modifiye k- ω (MKW), LES ve DES türbülans kapatma modellerini iki ve üç boyutlu modelleme kullanmışlardır. Çalışma sonucunda, SST türbülans kapatma modelinin akım alanının belirlemede daha iyi

sonuçlar verdiğini ve silindir üzerine gelen kuvvetlerin belirlenmesinde DES modelinin Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes (RANS) denklemlerini çözen modellere göre daha başarılı olduğunu ifade etmişlerdir. Yukarıda özetlenen çalışmalar dikkate alındığında değişik türdeki yapı akım etkileşimi problemlerinin sayısal modellenmesinde farklı türbülans modellerinin daha başarılı olduğu görülmektedir [9-13].

Bu çalışmada, açık kanal içerisinde daralma ve genişleme kesiti oluşturan trapez başlıklı yapı ile etkileşimde bulunan açık kanal akımı deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Deneysel çalışmalarda, akım alanı akustik doppler hız ölçer (ADV) ve akım profili limnimetre yardımıyla ölçülmüştür. Standart $k-\epsilon$ (SKE), Renormalization Group $k-\epsilon$ (RNG), Realizable $k-\epsilon$ (RKE), Standart $k-\omega$ (SKW), Kayma gerilmesi taşınımı (Shear Stress Transport-SST), Reynolds gerilme modeli (Reynolds Stress Model-RSM) ve Bağımsız Girdap Benzetimi (Detached-Eddy Simulation-DES) ve Büyük Girdap Benzetimi (Large Eddy Simulation-LES) modelleri kullanılarak, akım hız alanı ve su yüzü profili belirlenmiştir.

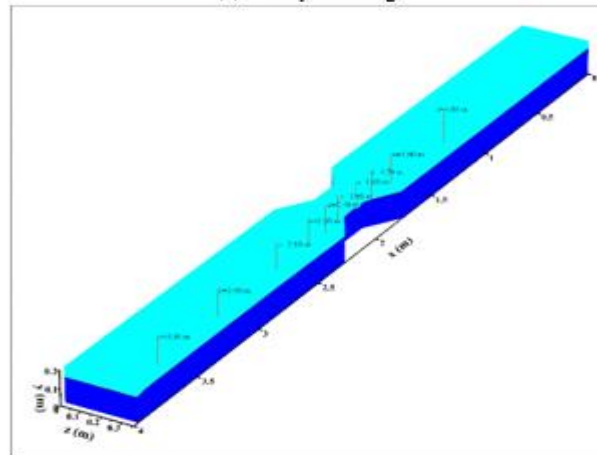
2. MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

2.1. Deneysel (Experiments)

Deneysel, Harran Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Hidrolik Laboratuvarında Şekil 1-a'da verilen açık kanal modelinin orta kısmında bir daralma yapısı oluşturularak yapılmıştır. Açık kanal modelinin, tabanı ve yan duvarları camdan imal edilmiştir. Dikdörtgen kesitli kanalın boyutları 4.00x0.35x0.35 m'dir. Suyun sirkülasyonu bir santrifüj pompa ile boyutları 1.20x0.70x0.50 m olan iki yer haznesinden, pompanın güç ayarı Schneider marka hız kontrol cihazı ile yapılmaktadır. Debi miktarı ise Altıgen marka cihaz ile $\pm\%0.6$ m³/saat hassasiyette elektronik debi ölçüm cihazı üzerinden okunmaktadır. Trapez kesitli daralma yapısının taban uzunluğu 0.49 m, kret genişliği 0.16 m, kret yüksekliği 0.10 m'dir. Daralma ve genişleme kesiti oluşturan bu yapı kanal başlangıcından 1.70 m mesafeye yerleştirilmiştir.



(a) Deneysel düzeneği



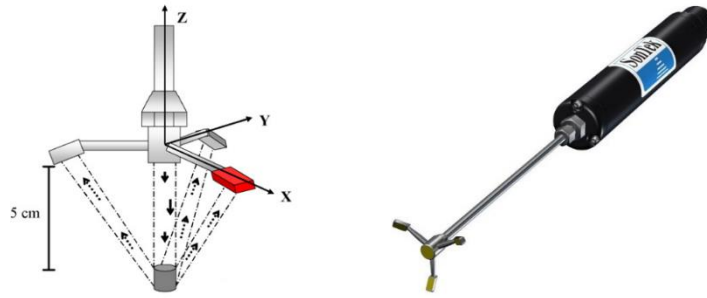
(b) Ölçüm noktaları

Şekil 1. Deneysel düzeneği ve ölçüm noktaları

Kanal üzerine yerleştirilmiş modelin akım karakteristikleri Şekil 2'te ADV cihazı ile yapılmıştır. Bu cihaz kanal üzerinde oluşturulan ray sistemi ile yatay ekseninde manuel olarak hareket etmekte, dikey ekseninde ise

hassas ölçüm alınabilmesi için bir elektronik sistem ile kontrol edilmektedir. Akımda pompa kapasitesinin en büyük olduğu debi için Şekil 1-b'de gösterilen $x=1.00, 1.50, 1.70, 1.80, 1.95, 2.10, 2.20, 2.50, 3.00$ ve 3.50 m kesitlerinde hız ölçümleri alınmıştır. Ölçüm aletinin özelliğinden dolayı su yüzünün 0.05 m aşağısında ölçüm yapılabilmektedir.

Bu çalışma kapsamında yapılan deneylerde giriş debisi $Q=10.3$ l/s, memba bölgesinde elde edilmiş akım özelliklerine göre Fr ($Fr = \frac{V}{\sqrt{gh}}$) = 0.148 ve Re ($Re = \frac{4Vh}{\nu}$) = 116 000 olarak hesap edilmiştir. Burada, V kesit ortalama hızı, g yerçekimi ivmesi, h su derinliği ve ν kinematik viskozitedir.



Şekil 2. Akustik doppler hız ölçer cihazı (ADV)

2.2. Temel Denklemler (Governing Equations)

Türbülanslı akımda kütle ve momentumun korunumunu idare eden temel denklemler, yani süreklilik ve Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes (RANS) denklemleri aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) = \rho g_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\tau_{ij}) \quad (2)$$

Bu denklemlerde ifade edilen u_i ortalama hız bileşenlerini, p ortalama basıncı, μ akışkanın dinamik viskozitesini, ρ akışkanın yoğunluğunu, ρg_i yerçekiminin sebep olduğu kütleli kuvveti, t zamanı, τ_{ij} ise türbülans (Reynolds) gerilmelerini ifade etmektedir. Reynolds gerilmeleri Boussinesq yaklaşımına göre aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\tau_{ij} = -\overline{\rho u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \rho k \quad (3)$$

Burada, u'_i ve u'_j türbülans hız sapıncıları ve μ_t türbülans viskozitesi olup δ_{ij} Kronecker deltasıdır ($i=j$ için $\delta_{ij}=1$).

2.3. Türbülans Kapatma Modelleri (Turbulence Closure Models)

RANS denklemlerinde üç boyutlu akışta bir basınç, üç hız, altı türbülans kayma gerilmesi bileşeni olmak üzere toplam 10 adet bilinmeyen bulunur. Buna karşılık üç RANS denklemi ve bir süreklilik denklemi olmak üzere sadece dört 4 denklem bulunduğundan denklem sistemi çözülememektedir. Bu sorunun çözülmesi ve denklem sisteminin kapatılabilmesi amacıyla farklı türbülans kapatma modelleri geliştirilmiştir. Bu çalışma kapsamında Standart k- ϵ (SKE) [14], Realizeble k- ϵ (RKE) [15], Renormatization Group k- ϵ (RNG) [16, 17], Standart k- ω (SKW) [18], Kayma gerilmesi taşınımı (Shear Stress Transport-SST) [19], Reynold Gerilme Modeli (Reynolds Stress Model-RSM) [20], Bağımsız Girdap Benzetimi (Detached-Eddy Simulation-DES) [21] ve Büyük Girdap Benzetimi (Large Eddy Simulation-LES) [22] modelleri kullanılmıştır.

2.4. Ağ Yakınsama İndeksi (Grid Convergence Index-GCI)

GCI yöntemi ile sayısal çözümlerin ayrıklaşma duyarlılığını belirlemek amacıyla kullanılmaktadır [23]. GCI yöntemi, farklı ağ yapısına ait sayısal sonuçların karşılaştırılmasını içermektedir. Böylece, hesaplama ağı ile elde edilen sayısal bulguların yakınsaması belirlenmekte ve ağ geometrisine bağlı belirsizliğin tahmini yapılabilmektedir. Bu yöntemin kullanılabilmesi için en az üç farklı yoğunluktaki hesaplama ağı kullanılmaktadır [24]. Buna göre;

$$d_3 < d_2 < d_1, e_{12} = u_1 - u_2, e_{23} = u_2 - u_3, r_{12} = \frac{d_1}{d_2}, r_{23} = \frac{d_2}{d_3} \quad 4$$

$$p = \frac{1}{\ln(r_{23})} \ln \left(\frac{(r_{23}^p - 1)e_{12}}{(r_{12}^p - 1)e_{23}} \right) \quad 5$$

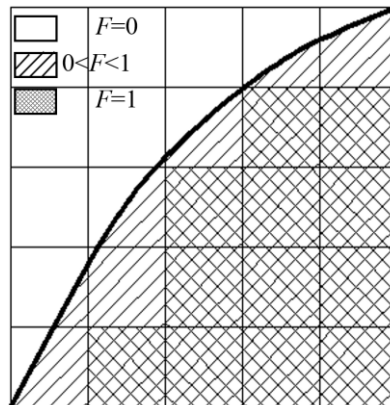
$$E_{23} = \frac{u_3 - u_2}{u_3} \quad 6$$

$$GCI_{23}^{ince} = F_s \frac{|E_{23}|}{r_{23}^p - 1} \quad 7$$

ifadeleri ile verilen değerler belirlenir. Yukarıdaki denklemlerde 1, 2 ve 3 indisleri sırasıyla kaba, orta ve ince ağ hassasiyetli parametreleri, u , akım hızını p : doğruluk mertebesi, F_s güvenlik faktörünü temsil etmektedir. Buna göre $r_{23}, r_{12} \geq 1.10$ olmalı ve üç veya daha fazla ağ yapısı için güvenlik faktörü F_s , 1.25 olarak önerilmektedir [23, 25]. İşlem sonucunda hesaplanan GCI_{23}^{ince} değeri %2'den daha küçük ise ağa bağlı sayısal hesaplama sonuçlarının kabul edilebilir hata sınırlarında olduğu ve hesaplama hassasiyetinin ağ yoğunluğundan bağımsızlaştığı sonucuna varılır.

2.5. Akışkan Hacimleri Yöntemi (Volume of Fluid Method-VOF)

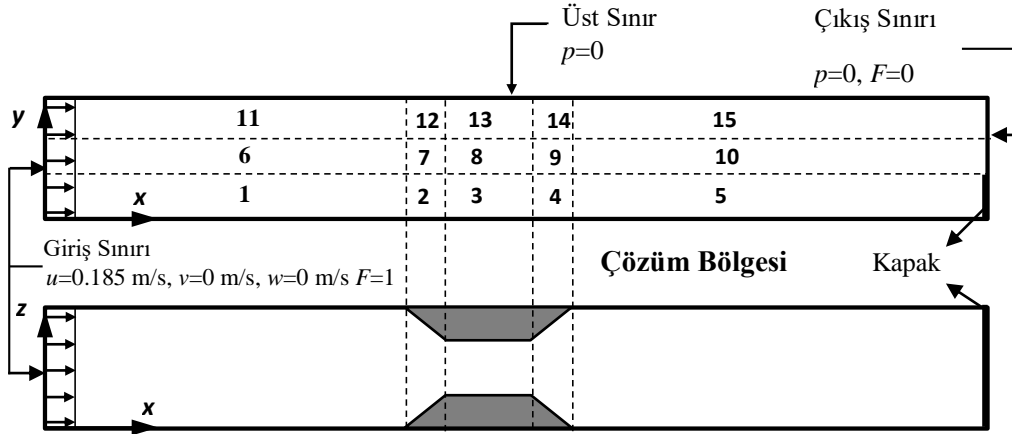
VOF yöntemi, birbirine karışmayan iki veya daha fazla akışkan arasındaki ara yüzeyin şeklinin belirlenebilmesi için çözüm ağına uygulanabilir [26]. Bu çalışma kapsamında su-hava ara kesitinin belirlenebilmesi için kullanılan bu yöntem, hücrelerin boş, kısmen ya da tam su ile dolu olduğunu belirlemede kullanılmaktadır. Buna göre, hacimsel doluluk oranını temsil etmesi için bir akışkan hacmi (F) tanımlanır. $F=1$ için ağ elemanı tam dolu, $F=0$ için boş (hava ile dolu) ve $0 < F < 1$ için ağ elemanı kısmen dolu olmaktadır (Şekil 3). VOF yönteminde ara kesitin hesaplanmasında farklı yaklaşımlar bulunmakla beraber, bu çalışmada "Geo-Reconstruct" yaklaşımı kullanılmıştır. Bu yöntem ile ilgili detaylar Gümüş [26]'te verilmiştir.



Şekil 3. Ağ elemanlarının doluluk oranları

2.6. Çözüm Bölgesi ve Sınır Şartları (Solution Domain and Boundary Conditions)

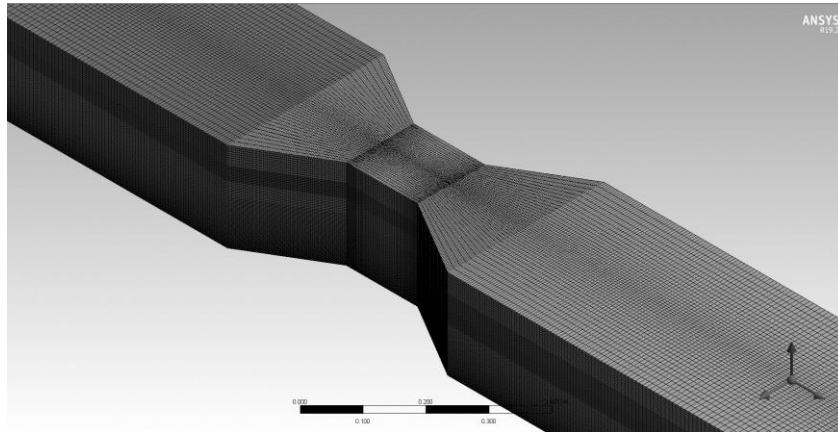
Şekil 4, değişken en kesitli açık kanal akımının sayısal modeli için kullanılan çözüm bölgesi ve sınır şartlarını göstermektedir. x , y , z koordinat sisteminin orijini, çözüm bölgesinin sol alt köşesi olarak alınmıştır. Şekilde verilen çözüm bölgesi toplam 15 alt bölgeye ayrılmış ve çözüm bölgesinin üst sınırı ve çıkış bölgesi sınır şartı $p=0$, kanal tabanında ve daralma ve genişleme yapısının yüzeylerinde sıfır-hız sınır şartı, yani $u=0$, $v=0$ olarak tanımlanmıştır. Giriş sınır şartı olarak v ve w hızları 0 olarak alınmış olup, yatay hız bileşeni deneysel verilerden hesap edilerek $u=0.185$ m/s olarak alınmıştır. Zamana bağlı çözüm sürecinde, başlangıç şartı olarak, $t=0$ anında boş olan çözüm bölgesinin giriş sınırında VOF yöntemi için $F=1$, diğer bölgeler ve çözüm bölgesinin çıkış sınırında ise $F=0$ alınmıştır.



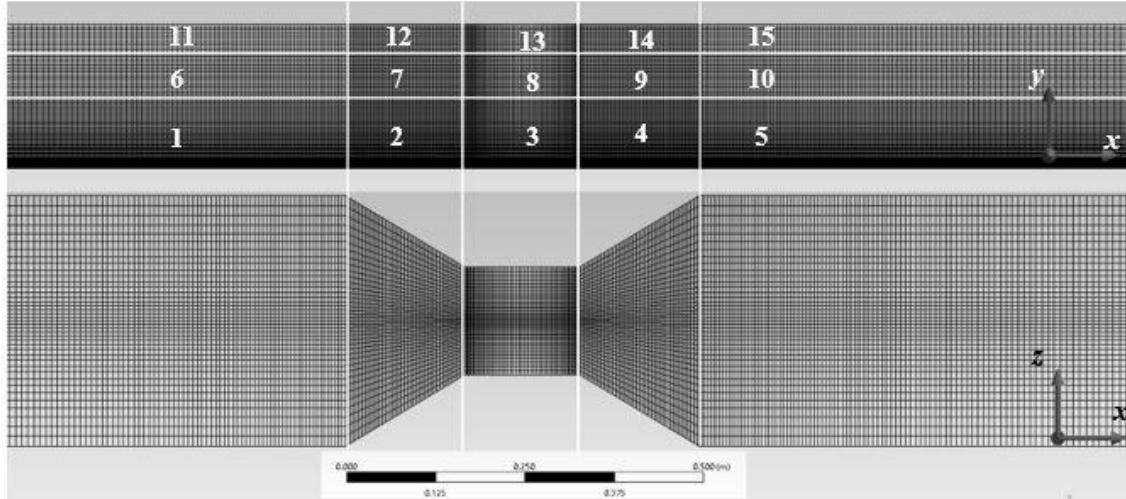
Şekil 4. Sayısal çözüm bölgesi ve sınır şartları

2.7. Hesaplama Ağının Belirlenmesi (Determination of Computational Grid)

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği problemlerinde oluşturulacak modelin ağ yapısının nümerik bulgular üzerinde oldukça fazla etkisi bulunmaktadır [9-13]. Bu nedenle hesaplama ağı tasarlanırken belli bir metodoloji kullanılması oldukça önem arz etmektedir. Bu çalışmada çözüm bölgesi, Şekil 5'te üç boyutlu yapısı ve Şekil 6'da verilen xy ve xz eksenlerine göre sayısal hesaplama ağında da görüldüğü gibi 15 alt bölgeye ayrılmış ve ağ yapısının sayısal çözüm değerleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Meydana gelecek ayrıklaştırma hatasının tespiti için üç farklı yoğunlukta hesaplama ağı oluşturulmuş ve ağ yapısının her bir alt bölgesindeki eleman sayısı yaklaşık olarak %25 ve %50 oranında artırılarak üç farklı yoğunluktaki hesaplama ağları kullanılmıştır. Tablo 1'de, sayısal hesaplamalarda kullanılan üç farklı yoğunluktaki ağ yapısı için eleman sayıları verilmiştir. Z doğrultusunda 40 parçaya bölünmüştür. Ayrıca katı yüzeylere doğru ağ yapısı sıklaştırılarak ilk hesap ağının viskoz alt tabaka içerisinde kalması sağlanmıştır.



Şekil 5. Üç boyutlu sayısal hesaplama ağı



Şekil 6. *xy ve xz eksenlerine göre sayısal hesaplama ağı*

Tablo 1. Farklı yoğunluktaki hesaplama ağlarına ait bölgesel eleman sayıları

Bölge	Ağ 1 (Kaba)	Ağ 2 (Orta)	Ağ 3 (İnce)	Bölge	Ağ 1 (Kaba)	Ağ 2 (Orta)	Ağ 3 (İnce)	Bölge	Ağ 1 (Kaba)	Ağ 2 (Orta)	Ağ 3 (İnce)
1	40x110	50x140	60x170	6	12x110	16x140	20x170	11	6x110	8x140	10x170
2	40x40	50x50	60x60	7	12x40	16x50	20x60	12	6x40	8x50	10x60
3	40x40	50x50	60x60	8	12x40	16x50	20x60	13	6x40	8x50	10x60
4	40x40	50x50	60x60	9	12x40	16x50	20x60	14	6x40	8x50	10x60
5	40x110	50x140	60x170	10	12x110	16x140	20x170	15	6x110	8x140	10x170

Ağ yapısının sıklığının yeterliliği yani sayısal çözümün ağ yapısından bağımsız olup olmadığının belirlenebilmesi için GCI yöntemi ile oluşturulan Ağ 1 (Kaba), Ağ 2 (Orta) ve Ağ 3 (İnce) değerlendirilmiştir. GCI yöntemi ile yapılan analizler sonucunda Ağ 3 ile oluşturulan ağ yapısı ile hesaplanan hız değerlerinin Gümüş (2014)'te verilen yakınsama değeri olan %2'den küçük olduğu belirlenmiştir. Böylece çözüm hassasiyetinin ağ yapısından bağımsızlaştığı sonucuna varılmıştır.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

3.1. Deneysel ve Hesaplanan Hız Profilleri (Experimental and Numerical Velocity Profiles)

ADV kullanılarak elde edilen deneysel hız profillerinin, sayısal çözüm sonrası elde edilen hız profilleri ile karşılaştırılmasında performans kriteri olarak sırasıyla Denklem 8 ve 9'da verilen Ortalama Karesel Hata (OKH) ve Ortalama Mutlak Göreceli Hata (OMGH) parametreleri kullanılmıştır.

$$OKH = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (u_d - u_{\square})^2 \quad 8$$

$$OMGH = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left(\frac{|u_d - u_{\square}|}{u_d} \right) \quad 9$$

Burada, u_d ve u_h sırasıyla deneysel ve sayısal hız değerini, N ise hız profilindeki nokta sayısını ifade etmektedir.

Tablo 2'de, kanal boyunca farklı kesitlerde, Denklem 10 kullanılarak elde edilen OKH değerleri verilmiştir. Elde edilen en küçük OKH değerleri çizelgelerde koyu renkle yazılmıştır. Bu OKH değerleri kesitteki en başarılı olan türbülans modelini göstermektedir. OKH değerleri üzerindeki rakamlar ise o kesitteki başarı sıralamasını göstermektedir.

Tablo 2'ye göre, DES modeli $x=1.00, 2.10, 3.00$ ve 3.50 m'de hesaplanan hız profillerinde en başarılı sonucu verirken, SKE modeli ise $x=1.50, 1.70$ ve 1.95 m'de en başarılı sonucu vermiştir. SKW $x=1.80$ m, LES $x=2.20$ m ve RKE $x=2.50$ m'de deneysel sonuçlara en yakın sonuçları vermişlerdir. Kanalın tamamı için ele alınan kesitlerin ortalamasına göre değerlendirme yapılacak olursa DES modeli $14.34 \text{ cm}^2/\text{s}^2$ OKH değeri ile en başarılı model olurken, hiçbir kesitte en başarılı model olmamasına rağmen RNG modeli $18.83 \text{ cm}^2/\text{s}^2$ OKH değeri ile en başarılı ikinci model olmuştur. Tüm kanal boyunca başarı sıralaması ise DES, RNG, SKE, RKE, LES, SKW, RSM ve SST şeklinde oluşmuştur. Kanalın akım profilinin hızlı değiştiği, daralma ve genişleme bölgesinde OKH değerlerine göre, tüm kanalda olduğu gibi yine DES modeli en başarılı model olurken, tüm kanal boyunca başarılı olmayan RSM modeli en başarılı ikinci model olmuştur. Daralma ve genişleme bölgesinde başarı sıralaması DES, RSM, LES, RNG, RKE, SKW, SKE ve SST şeklinde oluşmuştur.

Tablo 2.'ye göre, daralma bölgesinden etkilenmeyen ve kararlı bir akım olarak değerlendirilebilecek kanal başlangıcında ölçülen hız profilleri, $x=1.00$ ve 1.50 m'de neredeyse tüm modeller başarılı sonuçlar vermiştir. LES modeli dışındaki modellerde $x=1.00$ m'de $4 \text{ cm}^2/\text{s}^2$ 'den, $x=1.50$ m'de ise $2 \text{ cm}^2/\text{s}^2$ gibi bir OKH değeri hesaplanırken, daralma kesitinin başlangıcında hızların artmasından dolayı OKH değerlerinde bir artış meydana gelmiş ve $x=1.70$ m'de $3 \text{ cm}^2/\text{s}^2$, $x=1.80$ m'de $9 \text{ cm}^2/\text{s}^2$ 'nin altında bir değer hesaplanmıştır. Hız değerlerinin en yüksek olduğu ve en fazla daralmanın olduğu bölge olan $x=1.95$ m'de yine LES dışındaki tüm modeller ile elde edilen hız profillerinde $12 \text{ cm}^2/\text{s}^2$ 'nin altında bir OKH değeri hesaplanmıştır. Bu da LES dışındaki tüm modellerin kanal başlangıcından daralmadan sonra ve tekrar genişleme kesitine kadar benzer sonuçlar verdiği ve deneysel sonuçlar ile uyumlu olduğu görülmüştür. Ancak genişleme kesitinden sonra ($x=2.10$ m kesitinden itibaren) modellerin performansının azaldığı ve bu bölgeden sonra deneysel sonuçlarla olan uyumun ciddi bir şekilde azaldığı görülmüştür. Genişleme sonrası meydana gelen ayrılma bölgelerinin tahmininde türbülans modeli performanslarının yüksek olmadığı diğer bir ifade ile ayrılma bölgelerini tahmininde türbülans modelleri başarılı olamamıştır. Özellikle girdap etkilerini modellemede başarılı olan RNG modeli bu bölgede diğer modellere nazaran nispeten daha iyi sonuç vermiştir. Suyun yüksekliğini ayarlamak için kanal sonuna yerleştirilen kapağın akım üzerine etkisini modellemede DES ve RNG dışındaki modellerin performansının oldukça düşük olduğu görülmüştür.

Tablo 3'te ise yine kanal orta eksenini boyunca ölçülen ve sayısal olarak elde edilen hız profillerine göre hesaplanan OMGH değerleri verilmiştir. Bu değerlerin OKH değerinden farkı, hata oranını yüzde cinsinden ifade etmesidir. Böylece elde edilen sonuçlar, hız değerlerinin büyüklüğünden bağımsız olabilmektedir. Buna göre, kanal başlangıcında elde edilen hız profillerinde ($x=1.00$ ve 1.50 m) tüm modellerin hata değerinin %8'den düşük olduğu ve en başarılı modelin $x=1.00$ m'de RSM, $x=1.50$ m'de ise SKE olduğu görülmüştür. OKH değerlerine göre bu iki kesitte deneylerle en uyumlu model SKE çıkarken, OMGH değerine göre ise RSM çıkmasının nedeni, aralarındaki farkın oldukça düşük olmasıdır. Daralma başlangıç kesitleri olan $x=1.70$ ve 1.80 m kesitlerinde elde edilen OMGH değerine göre, en başarılı model, sırasıyla, SKE ve SKW, akımın akım alanında en fazla hızlandığı nokta olan $x=1.95$ m kesitinde ise SKW olarak belirlenmiştir. Akımın en hızlı olarak geliştiği, daralmanın en fazla olduğu kesit olan $x=1.95$ m'de OMGH %3,58 ile en başarılı tahmin yapılan kesit olarak ortaya çıkmıştır. Daralma sonrası genişleme kesitleri olan $x=2.10$ ve 2.20 m'de sırasıyla DES ve LES modelleri, kanalın sonuna doğru olan bölgede ise DES modeli deneysel ölçümlere en yakın sonuçları vermiştir. OKH ve OMGH değerleri beraber incelendiğinde, OKH değerine göre en uyumlu model olarak karşımıza çıkan bazı türbülans modellerinin ($x=1.00, 1.95$ ve 2.50 m) OMGH değerlerine göre en başarılı model olmamıştır. Bunun nedeni, modellerin deneysel sonuçları tahmin etmede başarılı ve aradaki farkın oldukça küçük olması olarak değerlendirilebilir. OMGH değerine göre tüm kanal boyunca ve daralma/genişleme kesitleri boyunca hesaplanan değerlerin ortalamalarına göre DES modeli OKH değerlerine paralel olarak en başarılı model olarak karşımıza çıkmıştır. Model başarı sıralaması ise tüm kanal boyunca DES, RNG, SKE, LES, RKE, RSM, SKW ve SST, daralma ve genişleme bölgesinde ise DES, LES, RSM, RNG, SKW, RKE, SKE ve SST olarak meydana gelmiştir.

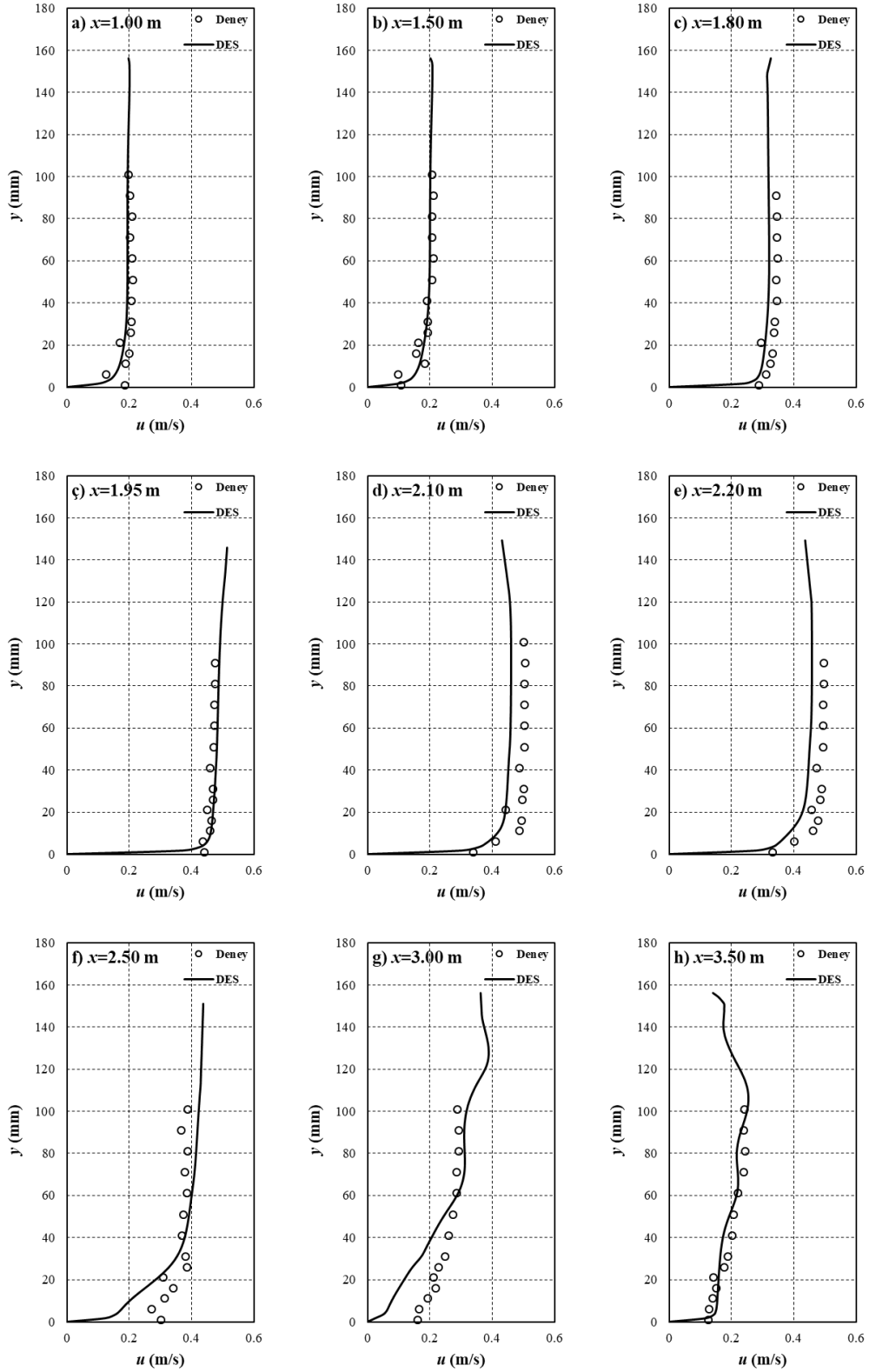
Tablo 2. Farklı türbülans modelleri ile hesaplanan OKH değerleri (cm^2/s^2)

x (m)	OKH (cm^2/s^2)							
	SKE	RKE	RNG	SKW	SST	RSM	DES	LES
1.00	38.5 ⁽³⁾	40.4 ⁽⁷⁾	38.6 ⁽⁴⁾	37.9 ⁽²⁾	39.0 ⁽⁶⁾	38.8 ⁽⁵⁾	36.4⁽¹⁾	68.5 ⁽⁸⁾
1.50	10.9⁽¹⁾	11.9 ⁽⁴⁾	11.1 ⁽²⁾	14.0 ⁽⁵⁾	15.8 ⁽⁶⁾	11.7 ⁽³⁾	18.2 ⁽⁷⁾	31.9 ⁽⁸⁾
1.70	20.8⁽¹⁾	22.0 ⁽³⁾	21.8 ⁽²⁾	22.3 ⁽⁴⁾	23.8 ⁽⁶⁾	23.0 ⁽⁵⁾	24.4 ⁽⁷⁾	38.8 ⁽⁸⁾
1.80	76.4 ⁽²⁾	78.2 ⁽³⁾	83.6 ⁽⁶⁾	71.9⁽¹⁾	83.2 ⁽⁵⁾	85.0 ⁽⁷⁾	82.4 ⁽⁴⁾	129.8 ⁽⁸⁾
1.95	93.2⁽¹⁾	102.1 ⁽⁴⁾	98.7 ⁽³⁾	96.7 ⁽²⁾	117.1 ⁽⁷⁾	110.3 ⁽⁶⁾	104.4 ⁽⁵⁾	154.3 ⁽⁸⁾
2.10	349.2 ⁽⁸⁾	319.2 ⁽⁶⁾	297.3 ⁽⁴⁾	311.6 ⁽⁵⁾	290.5 ⁽³⁾	216.8 ⁽²⁾	209.5⁽¹⁾	325.0 ⁽⁷⁾
2.20	537.9 ⁽⁷⁾	442.4 ⁽⁵⁾	352.4 ⁽⁴⁾	461.8 ⁽⁶⁾	972.4 ⁽⁸⁾	267.4 ⁽³⁾	209.5 ⁽²⁾	124.2⁽¹⁾
2.50	138.7 ⁽²⁾	131.4⁽¹⁾	289.1 ⁽³⁾	382.7 ⁽⁶⁾	4340.1 ⁽⁸⁾	945.6 ⁽⁷⁾	319.3 ⁽⁴⁾	364.4 ⁽⁵⁾
3.00	1195.4 ⁽³⁾	1580.4 ⁽⁴⁾	587.7 ⁽²⁾	2167.6 ⁽⁶⁾	2309.1 ⁽⁷⁾	2475.7 ⁽⁸⁾	396.9⁽¹⁾	1831.1 ⁽⁵⁾
3.50	355.9 ⁽⁵⁾	438.6 ⁽⁶⁾	102.2 ⁽²⁾	1066.5 ⁽⁸⁾	283.5 ⁽⁴⁾	467.3 ⁽⁷⁾	32.8⁽¹⁾	204.4 ⁽³⁾
Tüm Kanal	281.69	316.66	188.25	463.3	847.45	464.16	143.38⁽¹⁾	327.24
Daralma/Genişleme	215.5 ⁽⁷⁾	192.8 ⁽⁵⁾	170.8 ⁽⁴⁾	192.9 ⁽⁶⁾	297.4 ⁽⁸⁾	140.5 ⁽²⁾	126.1⁽¹⁾	154.4 ⁽³⁾

Tablo 3. Farklı türbülans modelleri ile hesaplanan OMGH değerleri (%)

x (m)	OMGH (%)							
	SKE	RKE	RNG	SKW	SST	RSM	DES	LES
1.00	6.57 ⁽³⁾	6.77 ⁽⁴⁾	6.55 ⁽²⁾	6.55 ⁽²⁾	6.86 ⁽⁵⁾	6.26⁽¹⁾	7.11 ⁽⁶⁾	8.00 ⁽⁷⁾
1.50	4.81⁽¹⁾	5.11 ⁽⁴⁾	4.88 ⁽²⁾	5.66 ⁽⁵⁾	6.14 ⁽⁶⁾	4.94 ⁽³⁾	6.26 ⁽⁷⁾	7.91 ⁽⁸⁾
1.70	4.69⁽¹⁾	4.87 ⁽³⁾	4.86 ⁽²⁾	4.94 ⁽⁴⁾	5.28 ⁽⁶⁾	5.07 ⁽⁵⁾	5.46 ⁽⁷⁾	6.15 ⁽⁸⁾
1.80	7.38 ⁽²⁾	7.43 ⁽³⁾	7.77 ⁽⁵⁾	7.04⁽¹⁾	7.74 ⁽⁴⁾	7.85 ⁽⁷⁾	7.79 ⁽⁶⁾	9.16 ⁽⁸⁾
1.95	3.83 ⁽²⁾	4.13 ⁽³⁾	4.20 ⁽⁴⁾	3.58⁽¹⁾	4.75 ⁽⁶⁾	4.65 ⁽⁵⁾	4.75 ⁽⁶⁾	6.26 ⁽⁷⁾
2.10	11.88 ⁽⁸⁾	11.25 ⁽⁷⁾	10.87 ⁽⁵⁾	10.95 ⁽⁶⁾	10.38 ⁽⁴⁾	9.04 ⁽²⁾	8.95⁽¹⁾	10.03 ⁽³⁾
2.20	15.36 ⁽⁷⁾	13.82 ⁽⁵⁾	12.30 ⁽⁴⁾	13.89 ⁽⁶⁾	17.29 ⁽⁸⁾	10.57 ⁽³⁾	9.39 ⁽²⁾	5.54⁽¹⁾
2.50	7.39⁽¹⁾	8.12 ⁽²⁾	11.17 ⁽³⁾	12.86 ⁽⁵⁾	48.23 ⁽⁸⁾	23.20 ⁽⁷⁾	12.73 ⁽⁴⁾	14.60 ⁽⁶⁾
3.00	42.59 ⁽³⁾	49.21 ⁽⁵⁾	28.45 ⁽²⁾	56.44 ⁽⁶⁾	59.32 ⁽⁷⁾	61.84 ⁽⁸⁾	22.85⁽¹⁾	48.14 ⁽⁴⁾
3.50	29.31 ⁽⁵⁾	33.09 ⁽⁷⁾	14.99 ⁽²⁾	52.97 ⁽⁸⁾	21.99 ⁽⁴⁾	32.43 ⁽⁶⁾	8.23⁽¹⁾	19.28 ⁽³⁾
Tüm Kanal	15.24 ⁽³⁾	16.07 ⁽⁵⁾	12.95 ⁽²⁾	18.64 ⁽⁷⁾	19.74 ⁽⁸⁾	17.91 ⁽⁶⁾	11.84⁽¹⁾	15.41 ⁽⁴⁾
Daralma/Genişleme	8.63 ⁽⁷⁾	8.30 ⁽⁶⁾	8.00 ⁽⁴⁾	8.08 ⁽⁵⁾	9.09 ⁽⁸⁾	7.44 ⁽³⁾	7.27⁽¹⁾	7.43 ⁽²⁾

Kanal boyunca farklı kesitlerde deneysel ve DES modeli ile sayısal olarak elde edilen u hızlarının derinlikle değişimleri Şekil 7’de verilmiştir. DES modeli ile $x=1.00, 1.50, 1.80, 1.95, 2.10, 2.20$ ve 3.50 m kesitlerinde elde edilen hız profilleri deneyler ile uyumlu olduğu şekillerden açıkça görülmektedir. $x=2.50$ ve 3.00 m kesitlerinde katı yüzeye yakın bölgede sınır tabakası gelişimi bölgesinde iyi tahminde bulunmamasına rağmen türbülanslı dış bölgede katı sınıra yakın bölgeye göre daha başarılı olmuştur.

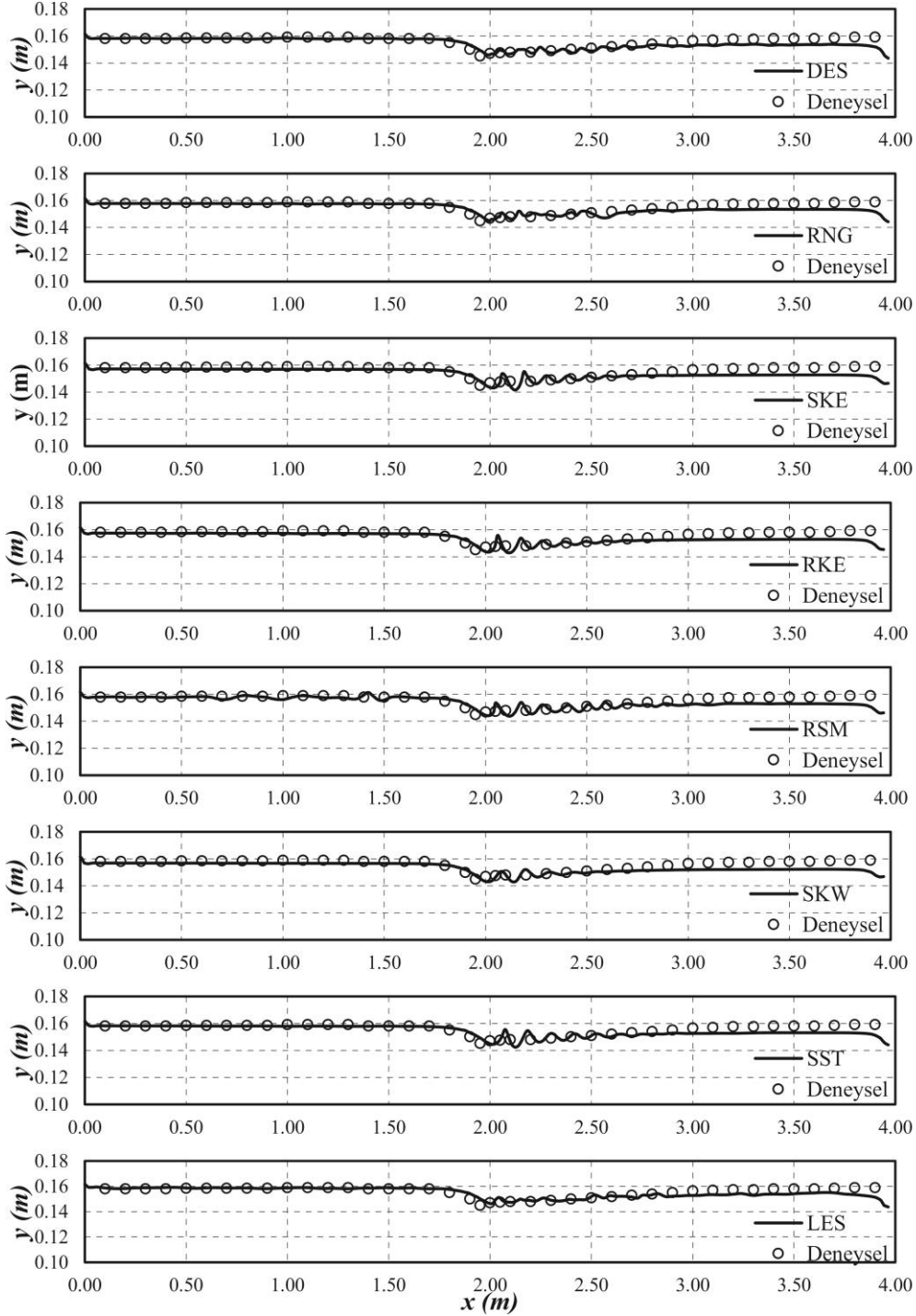


Şekil 7. Kanal boyunca farklı kesitlerde deneysel ve DES modeliyle hesaplanan hız profilleri

3.2. Deneysel ve Hesaplanan Su Yüzü Profilleri (Experimental and Numerical Free Surface Profiles)

Kullanılan tüm türbülans kapatma modeller için VOF yöntemi kullanılarak elde edilen su yüzü profilleri ve deneysel olarak ölçülen su yüzü profilleri Şekil 8’de, bu değerler ile hesaplanan OKH ve OMGH değerleri ise Tablo 4’te verilmiştir. Buna göre, daralma bölgesine kadar olan kısımda, hız profillerinde olduğu gibi

su yüzü profillerinde de benzer bir şekilde neredeyse tüm modeller su yüzünü belirlemede başarılı olmuştur. Su yüzünü belirlemede, kanal boyunca, DES modeli, daralma/genişleme bölgesinde ise RNG modeli diğer modellere nazaran daha başarılı sonuçlar vermiştir. Su yüzünü belirlemede başarı sıralaması tüm kanal beraber değerlendirildiğinde OKH değerlerine göre, DES, RNG, LES, RKE, SST, SKE, RSM ve SKW şeklinde, daralma/genişleme bölgesindeki başarı sıralaması ise RNG, DES, SKW, LES, RSM, RKE, SKE ve SST şeklinde meydana gelmiştir.



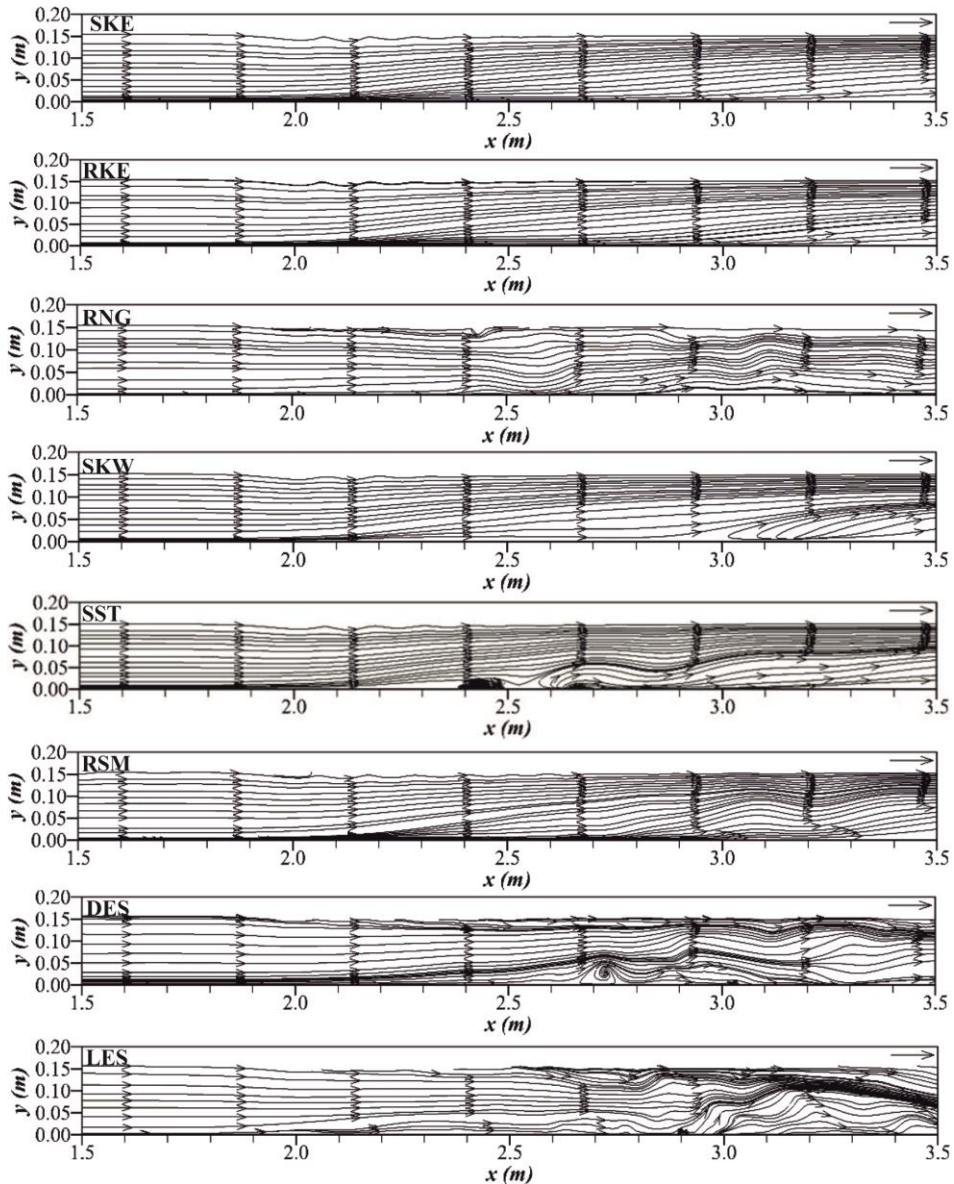
Şekil 8. Deneysel ve hesaplanan su yüzü profilleri

Tablo 4. Su yüzü profilleri için hesaplanan OKH (m^2) ve OMGH (%) değerleri

Bölge	OKH (cm^2/s^2)							
	SKE	RKE	RNG	SKW	SST	RSM	DES	LES
Tüm Kanal	0.3894 ⁽⁶⁾	0.3856 ⁽⁴⁾	0.3677 ⁽²⁾	0.4010 ⁽⁸⁾	0.3893 ⁽⁵⁾	0.3906 ⁽⁷⁾	0.3668⁽¹⁾	0.3764 ⁽³⁾
Daralma/Genişleme	0.0763 ⁽⁷⁾	0.0701 ⁽⁶⁾	0.0357⁽¹⁾	0.0503 ⁽³⁾	0.0839 ⁽⁸⁾	0.0666 ⁽⁵⁾	0.0382 ⁽²⁾	0.0550 ⁽⁴⁾
Bölge	OMGH (%)							
	SKE	RKE	RNG	SKW	SST	RSM	DES	LES
Tüm Kanal	2.1372 ⁽⁷⁾	2.048 ⁽⁵⁾	1.7985 ⁽³⁾	2.2853 ⁽⁸⁾	1.9062 ⁽⁴⁾	2.0219 ⁽⁶⁾	1.6715⁽²⁾	1.6795 ⁽²⁾
Daralma/Genişleme	1.4937 ⁽⁷⁾	1.4331 ⁽⁶⁾	0.9989⁽¹⁾	1.2633 ⁽⁴⁾	1.5169 ⁽⁸⁾	1.4328 ⁽⁵⁾	1.0017 ⁽²⁾	1.1821 ⁽³⁾

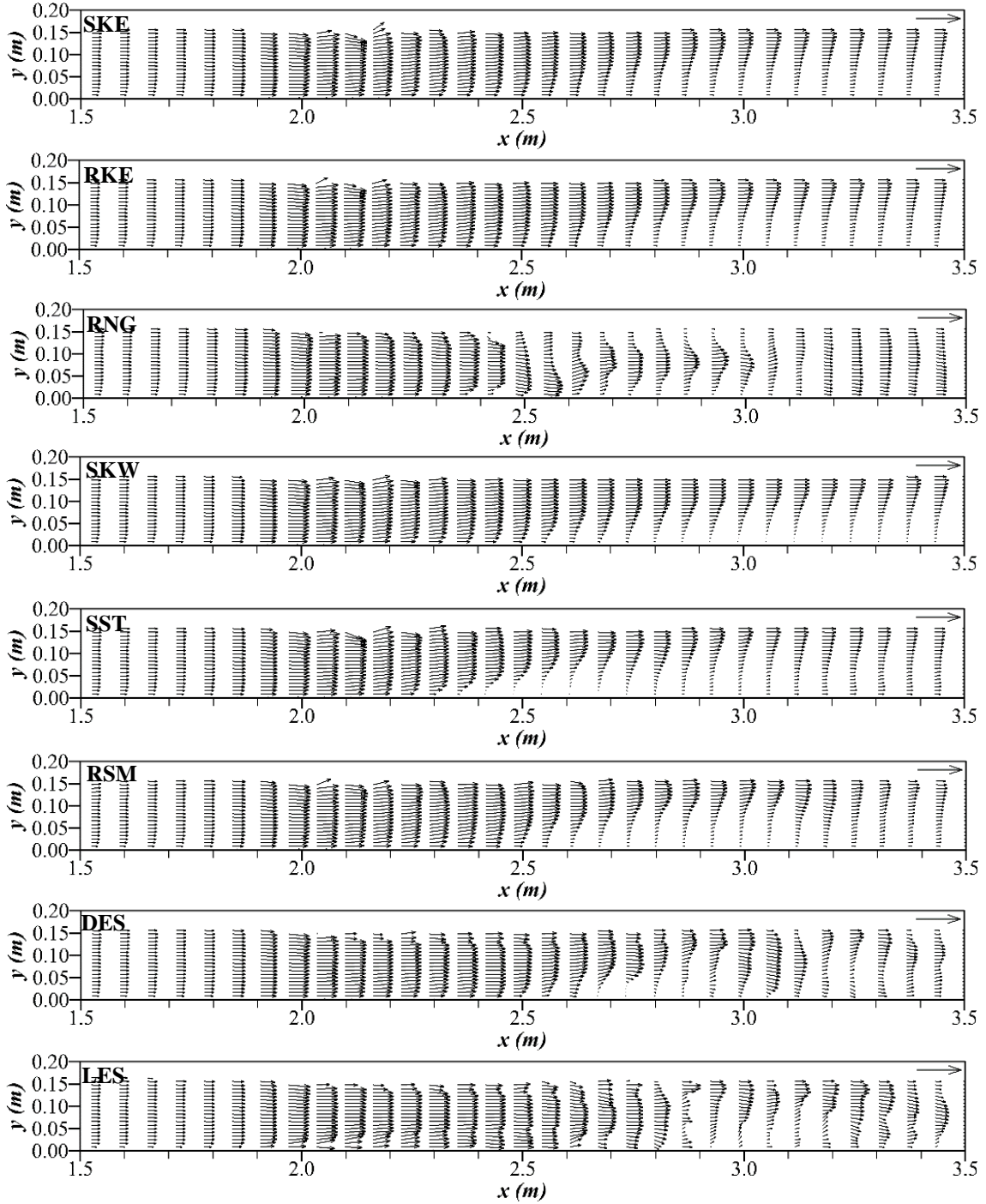
3.3. Sayısal Akım Çizgileri (Numerical Streamlines)

Sayısal olarak $z=0.1755$ m’de hesaplanan akım çizgilerinin topolojisi $k-\epsilon$ grubu, $k-\omega$ grubu, RSM, DES ve LES için Şekil 9’da verilmiştir. Buna göre, hız ve su yüzü profillerini tahmin etmede en başarılı model olarak ortaya çıkan DES modelinde $x=2.70$ m civarında bir ayrılma bölgesi meydana geldiği görülmektedir. SST’de ayrılma bölgesi $x=2.40$ m’de SKW’da ise $x=3.00$ m’de meydana gelmektedir. Özellikle daralma sonrası bir ayrılma bölgesine deneysel olarak ölçüm alınan bölgelerde rastlanmamıştır.

**Şekil 9.** Farklı türbülans modeli ile elde edilen akım çizgileri desenleri ($z=0.175$ m)

3.4. Sayısal Hız Vektörleri (Numerical Velocity Vectors)

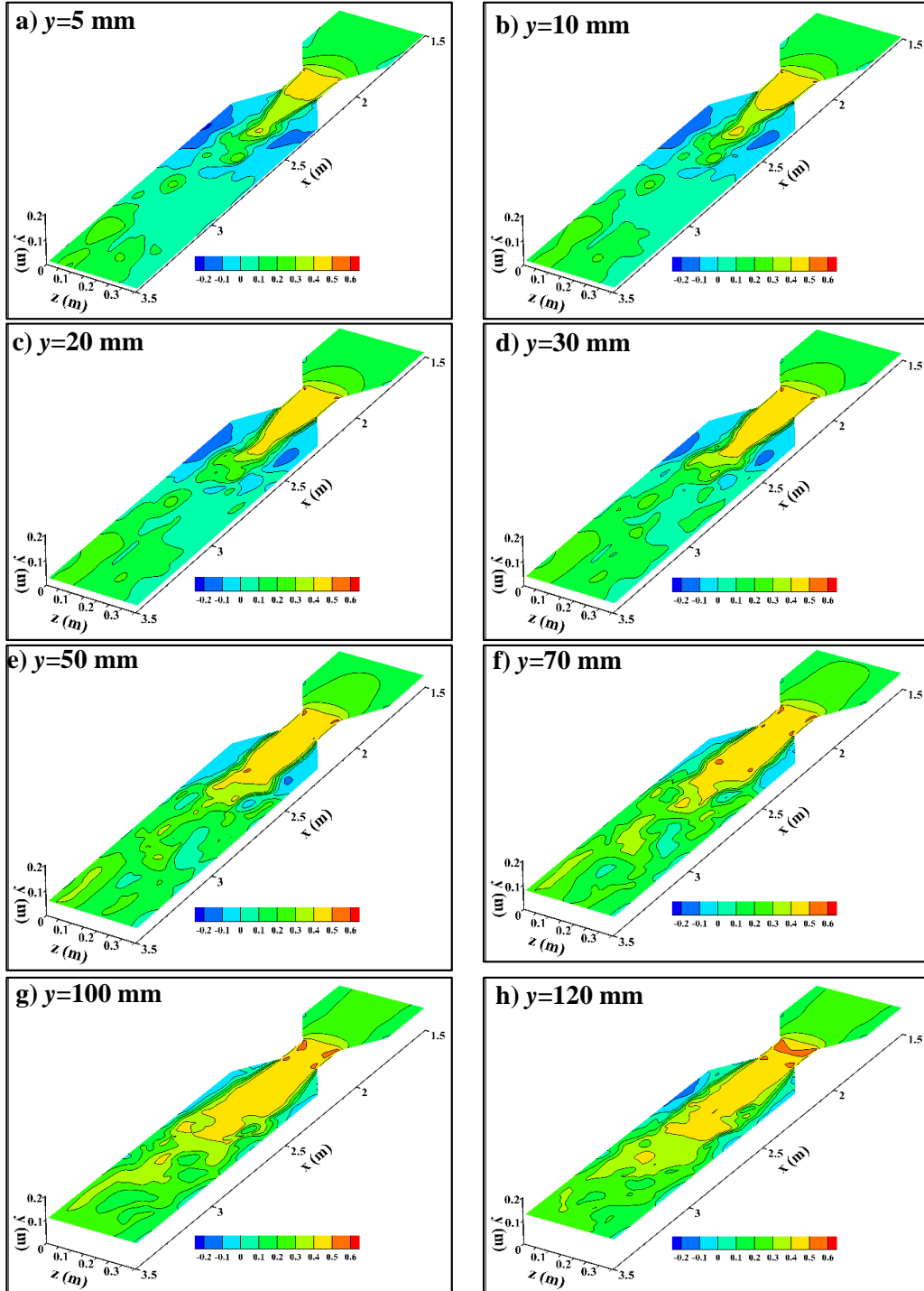
Kanal orta ekseninde ($z=0.175$ m kesitinde) SKE, RKE, RNG, SKW, SST, RSM, DES ve LES modelleri ile hesaplanan hız vektörlerinin $x=1.50-3.50$ m aralığındaki deseni Şekil 10'da verilmiştir. Buna göre, daralma bölgesinde, beklendiği gibi, hız vektörlerinin boyutunda bir artış meydana gelmekte, genişleme başladığında ise hızlarda bir azalma meydana gelmektedir. Elde edilen hız vektörleri deseninin Şekil 9'da verilen akım çizgileri deseniyle de uyumlu olduğu görülmektedir.



Şekil 10. Farklı türbülans modeli ile elde edilen hız vektörleri desenleri ($z=0.175$ m)

3.5. Yatay Hız Bileşeninin (u) Üç Boyutlu Dağılımı (Three Dimensional Distributions of Horizontal Velocity Component)

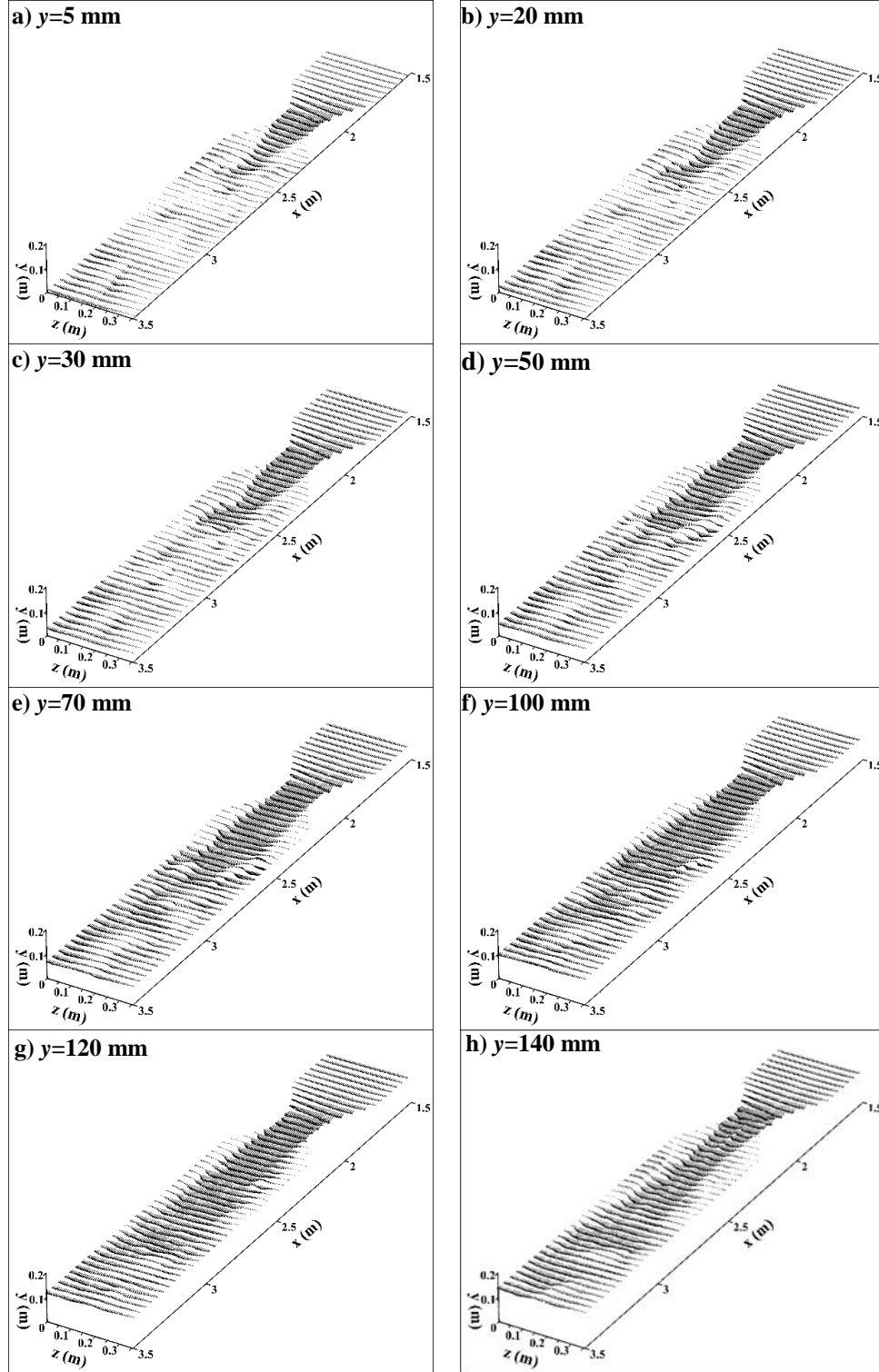
DES modeli kullanılarak elde edilen u hızlarının derinlikle değişimleri Şekil 11’de verilmiştir. Buna göre, katı sınıra yakın olan bölgede akım hızlarının düşük olduğu ve su yüzüne yaklaştıkça hızlarda bir artış meydana geldiği görülmektedir. Özellikle tabana yakın bölge içerisinde olan ve daralmanın bittiği noktadan sonra yan duvara yakın olan bölgelerde durma noktası meydana geldiği, ancak katı sınırdan uzaklaştıkça akım profilinde pozitif bir hız bileşeni meydana geldiği görülmüştür.



Şekil 11. DES ile hesaplanan u hızının topolojisinin derinlikle değişimi

3.6. Sayısal Hız Vektörlerinin Üç Boyutlu Dağılımları (3D Distributions of Numerical Velocity Vectors)

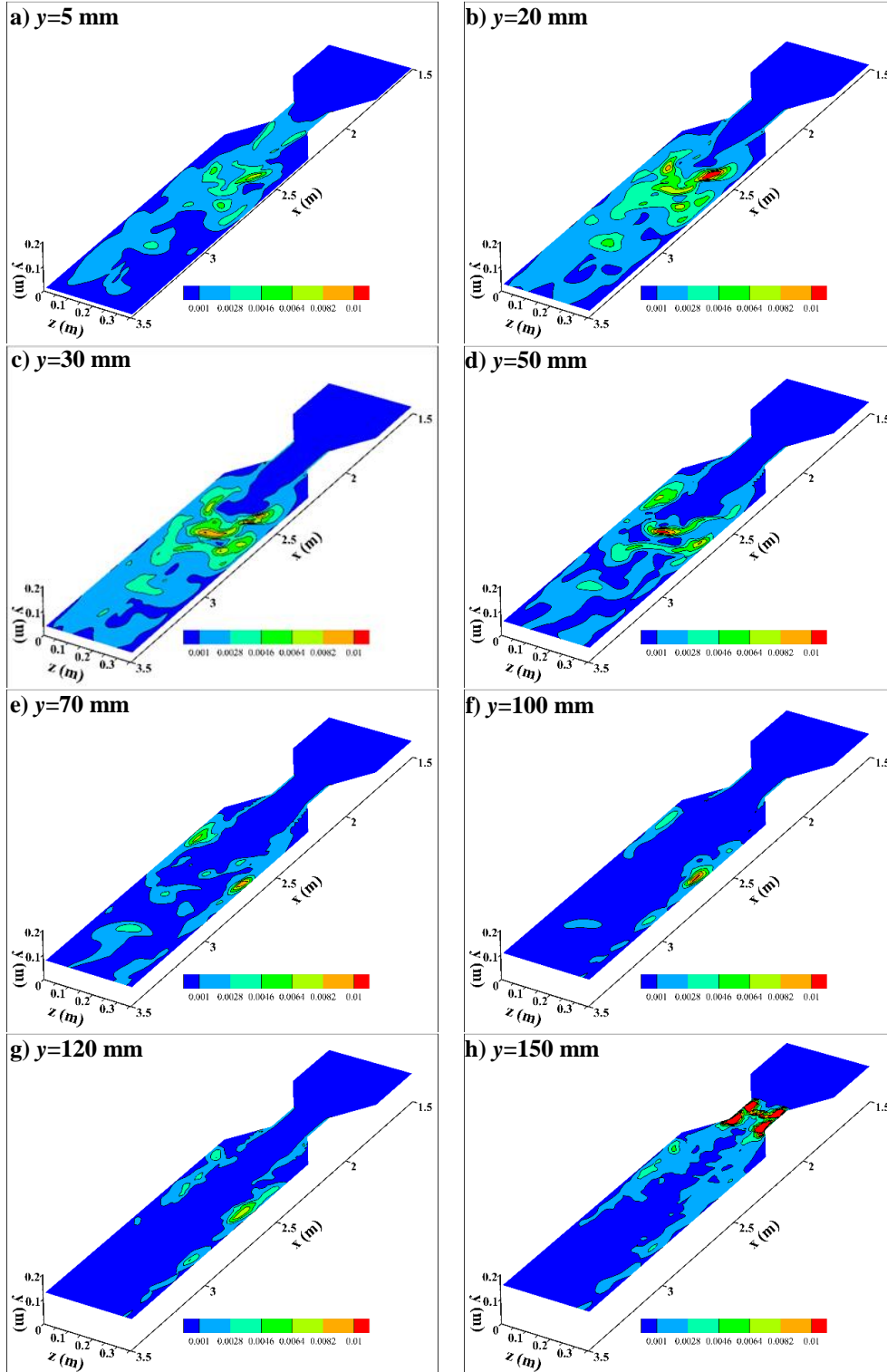
DES modeli kullanılarak hesaplanan hız vektörlerinin derinlikle değişimleri Şekil 12’de verilmiştir. Buna göre hız vektörlerinin derinlikle beraber arttığı ve daralma bölgesinde de beklendiği gibi hız vektörlerinin en yüksek değere eriştiği görülmektedir.



Şekil 12. DES ile hesaplanan hız vektörlerinin derinlikle değişimi

3.7. Sayısal Türbülans Kinetik Enerjisinin Üç Boyutlu Dağılımı (3D Distribution of Numerical Turbulence Kinetic Energy)

DES modeli ile hesaplanan türbülans kinetik enerjisi (TKE) topolojisinin derinlikle değişimi Şekil 13'te verilmiştir. TKE değeri kanal tabanında genellikle $0.002 \text{ m}^2/\text{s}^2$ ile $0.006 \text{ m}^2/\text{s}^2$ arasında değişim gösterirken, özellikle daralma elemanının sonrasında meydana gelen kuyruk akımında arttığı görülmüştür. Daralma bölgesinde akım alanında meydana gelen değişimden dolayı hızda meydana gelen değişimler artmakta, su yüzeyine yakın olan bölgede TKE değeri artmakta ve TKE değeri maksimum olmaktadır.



Şekil 13. DES ile hesaplanan TKE topolojisinin derinlikle değişimi

5. SONUÇ (CONCLUSION)

Açık kanal içerisinde trapez başlıklı bir yapı ile oluşturulan daralma ve genişleme kesitlerine sahip akım deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Deneysel çalışmalarda, akım alanı Akustik Doppler Hız Ölçer ile ve akım profili limnimetre yardımıyla ölçülmüştür. Sayısal modellemelerde SKE, RKE, RNG, SKW, SST, RSM, DES ve LES olmak üzere sekiz model kullanılmış ve bu modellerin akım alanını ve su yüzü profilini tahmin etmedeki başarısı test edilmiştir. Ağ yapısının sıklığının yeterliliği yani sayısal çözümün ağ yapısından bağımsız olup olmadığı belirlenebilmesi için GCI yöntemi ile analizler yapılmış ve hata değerinin %2'den küçük olduğu görülmüş ve çözümün ağ yapısından bağımsızlaştığı sonucu elde edilmiştir. Sayısal hız ve su yüzü profillerinin deneysel sonuçlarla karşılaştırılmasından, DES modeli tüm kanal boyunca elde edilen OKH ve OMGH değerlerine göre en başarılı model olmuştur. Yatay hız bileşeni (u) değerinin daralma bölgesi sonrasında oluşan negatif hız değerinin olduğu bölgenin büyüklüğü kanal tabanından su yüzüne doğru ilerledikçe azalmaktadır. Kanal orta eksenine göre hız bileşenin dağılımının simetrik olduğu belirlenmiştir. Kanal tabanından serbest su yüzüne doğru ilerledikçe sayısal hız vektörlerinin yoğunluğunun arttığı görülmüştür. TKE değerleri kanal tabanında genellikle $0.002 \text{ m}^2/\text{s}^2$ ile $0.006 \text{ m}^2/\text{s}^2$ arasında değişim gösterirken, özellikle daralma elemanının sonrasında meydana gelen kuyruk akımında arttığı ve daralma bölgesinde su yüzeyine yakın olan bölgede maksimum değere ulaştığı görülmüştür. Ayrıca elde edilen sonuçlardan, sayısal hesaplama yöntemlerinin bu tür akım problemlerinin çözümünde başarılı bir şekilde kullanılabileceği görülmüştür.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışma Harran Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi (HÜBAP) tarafından desteklenmiştir (Proje No:17080).

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Ho, D., Boyes, K., Donohoo, S., & Cooper, B. (2004). Numerical flow analysis for spillways. 43rd Aincold Bulletin, Hobart, Tasmania, 127-138.
- [2] Daneshkhan, A., & Vosoughifar, H. (2012). Solution of flow field equations to investigate the best turbulent model of flow over a standard ogee spillway in finite volume method. The First International Conference on Dams-Hydropower, Iran, 1-9.
- [3] Soydan, N. G., Şimşek, O., & Aköz, M. S. (2017). Prediction and validation of turbulent flow around a cylindrical weir. European Water, 57, 85-92.
- [4] Soydan, N. G., Şimşek, O., & Aköz, M. S. (2018). Köprü ayağı etrafındaki türbülanslı akımın sayısal ve deneysel analizi. Politeknik Dergisi, 21(1), 137-147.
- [5] Ozmen-Cagatay, H., & Kocaman, S. (2012). Investigation of dam-break flow over abruptly contracting channel with trapezoidal-shaped lateral obstacles. Journal of Fluids Engineering, 134(8), 081204.
- [6] Huang, J., Weber, L. J., & Lai, Y. G. (2002). Three-dimensional numerical study of flows in open-channel junctions. Journal of hydraulic engineering, 128(3), 268-280.
- [7] Bell, S. W., Elliot, R. C., & Hanif Chaudhry, M. (1992). Experimental results of two-dimensional dam-break flows. Journal of Hydraulic Research, 30(2), 225-252.
- [8] Aköz, M. S., Simsek, O., & Soydan, N. G. (2019). Numerical modeling of interaction of turbulent flow with a buried circular cylinder on a plane surface. Teknik Dergi, 30(6), 9621-9645.
- [9] Gumus, V., Simsek, O., Soydan, N. G., Aköz, M. S., & Kirkgoz, M. S. (2015). Numerical modeling of submerged hydraulic jump from a sluice gate. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 142(1), 04015037.

- [10] Simsek, O., Aköz, M. S., & Soydan, N. G. (2016). Numerical validation of open channel flow over a curvilinear broad-crested weir. *Progress in Computational Fluid Dynamics, an International Journal*, 16(6), 364-378.
- [11] Telkiran, M. N., Aköz, M. S., Şimşek, O., & Soydan, N. G. (2019). Dolusavak üzerinden geçen akımın sayısal analizi: Mersin Dereyurt Göleti dolusavak örneği. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 34(1), 155-168.
- [12] Şimşek, O., Parmaksız, M., & Gümüş, V. (2019). Radyal kapak ile etkileşimde bulunan açık kanal akımının sayısal modellenmesi. *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 8(2), 965-978.
- [13] Aköz, M. S., Soydan, N. G., & Şimşek, O. (2016). Kritik üstü açık kanal akımının detached eddy ve large eddy simülasyon ile sayısal modellenmesi. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 4(4), 213-224.
- [14] Launder, B. E., & Spalding, D. B. (1972). *Mathematical models of turbulence*. Academic Press, New York, 169s, 1972.
- [15] Shih, T. H., Liou, W. W., Shabbir, A., Yang, Z., & Zhu, J. (1995). A new $k-\epsilon$ eddy viscosity model for high Reynolds number turbulent flows. *Computers & Fluids*, 24(3), 227-238.
- [16] Yakhot, V., & Orszag, S. A. (1986). Renormalization-group analysis of turbulence. *Physical Review Letters*, 57:14, 1722-1724.
- [17] Yakhot, V. S. A. S. T. B. C. G., Orszag, S. A., Thangam, S., Gatski, T. B., & Speziale, C. G. (1992). Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique. *Physics of Fluids A: Fluid Dynamics*, 4(7), 1510-1520.
- [18] Wilcox, D. C. (2006). *Turbulence modeling for CFD (Third Edition)*. La Canada, CA: DCW Industries. Inc, November. 522s, 2006.
- [19] Menter, F. R. (1994). Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA journal*, 32(8), 1598-1605.
- [20] Launder, B. E., Reece, G. J., & Rodi, W. (1975). Progress in the development of a Reynolds-stress turbulence closure. *Journal of fluid mechanics*, 68(3), 537-566.
- [21] ANSYS. (2018). *Fluent Theory Guide*, ANSYS Inc. USA.
- [22] Roache, P. J. (1994). Perspective: a method for uniform reporting of grid refinement studies. *Journal of fluids engineering-transactions of the ASME*, 116:3, 405-413.
- [23] Roache, P. J. (1998). Verification of codes and calculations. *AIAA journal*, 36(5), 696-702.
- [24] Roache, P. J. (1997). Quantification of uncertainty in computational fluid dynamics. *Annual review of fluid Mechanics*, 29(1), 123-160.
- [25] Hirt, C. W., & Nichols, B. D. (1981). Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. *Journal of computational physics*, 39(1), 201-225.
- [26] Gümüş, V. (2014). Dolusavak akımının sayısal modellenmesi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Adana, 129s.

Investigation of Various Parameters in Hydrogen Production by Electrolysis Method from Çan Lignite

Özgu YÖRÜK^{1,*}  Duygu UYSAL ZIRAMAN²  Özkan Murat DOĞAN³  Bekir Zühtü UYSAL⁴ 

^{1,2,3,4} Gazi University Faculty of Engineering, Department of Chemical Engineering and Clean Energy Research and Application Center (CERAC), Maltepe/ANKARA

Graphical/Tabular Abstract

Article Info:

Research article
 Received: 03/08/2019
 Revision 23/10/2019
 Accepted: 10/11/2019

Highlights

- Determination of optimum conditions for hydrogen production by electrolysis from Çanakkale/Çan lignite
- Effect of coal particle size, temperature, mixing speed, electrode material and addition of Fe^{+2} ion on current density

Keywords

Hydrogen
 Electrolysis
 Lignite

In this study, various parameters (coal particle size, temperature, mixing speed, electrode material and addition of Fe^{+2} ion) affecting hydrogen production by electrolysis of Çanakkale/Çan lignite-water slurries were investigated. Experiments were carried out in two electrode (anode/cathode) electrolysis cell, in acidic medium using 1 M H_2SO_4 as electrolyte at atmospheric pressure.

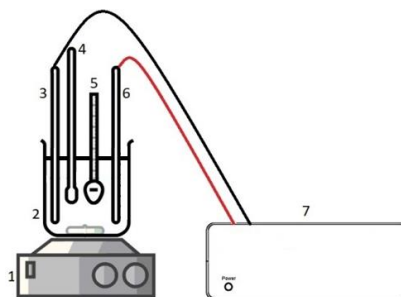


Figure A. Electrolysis system

Purpose: In this study, it is aimed to obtain an approximation of optimum hydrogen production conditions by examining the effects of various parameters such as coal particle size, electrode material, temperature, mixing speed and catalytic effective additives added to solution on hydrogen production by electrolysis of Çanakkale/Çan lignite.

Theory and Methods: By using coal in the electrolysis method, it is possible to reduce the cost resulting from high energy consumption and thus more economical production of high purity hydrogen. For this purpose, Çanakkale/Çan lignite was used in the experiments. In the experiments carried out in simple electrolysis cell, the effect of various parameters on current density was investigated by potentiostatic method. All examined parameters and their effects on current density are given in the paper.

Results: The results have shown that the highest hydrogen production efficiency for the electrolysis cell in which the experiments are carried out is achieved by using Zn/Zn electrode at high temperature, Fe^{+2}/Fe^{+3} doped medium, small particle size and high mixing speed. In addition to this, it is determined that Cu and Zn, which are more economical than expensive electrode materials such as Pt, can be used as electrode material.

Conclusion: The effects of various parameters (coal particle size, electrode material, solution temperature, solution mixing speed and catalytic additive added to the solution) on current density for hydrogen production by electrolysis of Çanakkale/Çan lignite are presented in this study. Depending on the determined parameters for hydrogen production, an approach has been obtained regarding optimum hydrogen production under the studied conditions.

In addition, due to the low calorific value of Çan lignite, which is a low-rank coal in terms of coalification process, its usage area is limited. With this conducted study, it is seen that utilization of low-rank coals in this type of applications can be achieved with very efficient results.



Çan Linyitinden Elektroliz Yöntemi ile Hidrojen Üretiminde Çeşitli Parametrelerin Etkisinin İncelenmesi

Özgü YÖRÜK^{1,*}, Duygu UYSAL ZIRAMAN², Özkan Murat DOĞAN³, Bekir Zühtü UYSAL⁴

^{1,2,3,4} Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü ve Temiz Enerji Araştırma ve Uygulama Merkezi (TEMENAR), 06570, Maltepe/ANKARA

Öz

Hidrojenin elektroliz yöntemi ile yüksek saflıkta elde edilebileceği kaynaklar arasında olan kömür, düşük maliyeti ve büyük arz nedeniyle cazip bir seçenektir. Bu çalışmada, Çanakkale/Çan linyiti-su bulamaçlarının elektrolizi ile hidrojen üretimine etki eden çeşitli parametreler (kömür partikül büyüklüğü, sıcaklık, karıştırma hızı, elektrot malzemesi ve Fe^{+2} iyonunun etkisi) incelenmiştir. Deneyler, iki elektrotlu (anot/katot) elektroliz hücresinde, elektrolit olarak 1 M H_2SO_4 kullanılarak asidik ortamda ve atmosferik basınçta gerçekleştirilmiştir. Atmosferik basınçta gerçekleştirilen deneylerde elektrot olarak bakır-bakır ve çinko-çinko elektrot kullanılmıştır. Sıcaklığın akım yoğunluğu üzerindeki etkisini belirleyebilmek için, oda sıcaklığından 80°C'ye kadar düzenli aralıklarla ölçümler yapılmıştır. Akım yoğunluğunun sıcaklıkla arttığı tespit edilmiştir. Ayrıca, üç farklı partikül boyutunda (1,0-0,5 mm, 0,50-0,25 mm ve <0,25 mm) yapılan deneylerde, en yüksek akım yoğunluğu değerleri en küçük partikül boyutunda elde edilmiştir. Fe^{+2} iyonunun etkisi, kömür-su karışımına 0,1 M $FeSO_4$ ilave edilerek sağlanmıştır ve Fe^{+2} iyonu ilavesinin, akım yoğunluğunu 80°C ve 0,73 V'da yaklaşık %33 artırdığı görülmüştür. Karıştırma hızının iki katına çıkarılması ile de akım yoğunluğu 80°C ve 0,3 V'da %38 artmıştır.

Investigation of Various Parameters in Hydrogen Production by Electrolysis Method from Çan Lignite

Abstract

Coal, which is one of the sources where hydrogen can be obtained by electrolysis with high purity, is an attractive option due to its low cost and large supply. In this study, various parameters (coal particle size, temperature, mixing speed, electrode material and addition of Fe^{+2} ion) affecting hydrogen production by electrolysis of Çanakkale/Çan lignite-water slurries were investigated. Experiments were carried out in two electrode (anode/cathode) electrolysis cell, in acidic medium using 1 M H_2SO_4 as electrolyte at atmospheric pressure. In the experiments copper-copper and zinc-zinc electrodes were used as electrodes. In order to determine the effect of temperature on the current density, measurements were carried out at regular intervals from room temperature to 80°C. It was determined that current density increased with temperature. In the experiments carried out with three different particle sizes (1.0-0.5 mm, 0.50-0.25 mm and <0.25 mm), the highest current density values were obtained with the smallest particle size. The effect of Fe^{+2} ion was achieved by adding 0.1 M $FeSO_4$ to the coal-water slurry and it was observed that the addition of Fe^{+2} ions increased the current density by approximately 33% at 80°C and 0.73 V. Doubling the mixing speed increased the current density by 38% at 80°C and 0.3 V.

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 03/08/2019
Düzeltilme: 23/10/2019
Kabul: 10/11/2019

Anahtar Kelimeler

Hidrojen
Elektroliz
Linyit

Keywords

Hydrogen
Electrolysis
Lignite

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Depolanabilir, taşınabilir, yenilenebilir, temiz, ekonomik, güvenilir, yakıt olarak kullanılabilir nitelikte olan hidrojen, birincil enerji kaynaklarının tamamı ile elde edilebilmektedir. Başka enerjilere kolaylıkla dönüştürülebilmesi, hidrojeni geleceğin en önemli enerji taşıyıcısı ve dolayısıyla yakıtı konumuna getirmektedir [1].

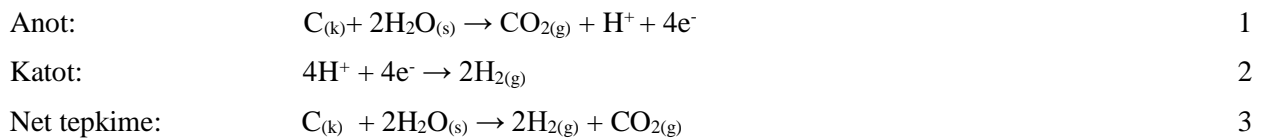
Hidrojen üretimi için çok çeşitli yöntemler olmasına rağmen, halen en yaygın kullanılan üretim yöntemleri doğalgazın yeniden yapılandırılması (reforming), gazlaştırma ve suyun elektrolizidir. Fakat bu yöntemlerle üretilen hidrojenin birim maliyetinin yüksek olması nedeni ile hidrojen halen ekonomik bir yakıt olamamaktadır. Yapılan araştırmalar, hidrojenin maliyet açısından diğer yakıtlarla kıyaslandığında yaklaşık üç kat daha pahalı olduğunu ve yaygın olarak kullanılabilmesinin hidrojen üretiminde maliyet düşürücü teknolojik gelişmelere bağlı olacağını göstermektedir [2]. Bu nedenle geleceğin alternatif yakıtı olarak düşünülen hidrojenin, ekonomik olarak üretimi için yenilikçi teknolojilerin araştırılmasının veya mevcut teknolojilere özgün bir yaklaşım getirerek geliştirilmesinin büyük bir önemi vardır.

Mevcut teknolojilerden suyun elektrolizi ile hidrojen üretimi yöntemi, gazlaştırma ve doğalgaz reforming ile karşılaştırıldığında daha temiz, daha yüksek saflıkta hidrojen elde edilebilmesi ve işletme koşullarının daha ılımlı olması gibi pek çok avantaja sahiptir [3,4]. Ancak yüksek enerji tüketimi, yöntemin en büyük dezavantajıdır [5]. Bu nedenle elektroliz yönteminde farklı kaynaklar kullanılarak yüksek enerji tüketiminden kaynaklanan maliyetin düşürülmesi ve böylelikle yüksek saflıkta hidrojenin daha ekonomik üretimi için yenilikçi ve özgün teknolojilerin geliştirilmesi ve araştırılması önem arz etmektedir.

Hidrojen üretim süreçlerinde saflaştırma maliyetleri de dahil olmak üzere kömürün elektroliz yöntemi ile tekrar yapılandırılmasıyla hidrojen eldesi, suya ve nükleere göre çok daha ucuzdur [6]. Ayrıca kömür rezervlerinin 150 yıldan fazla ömrü olduğu ve uzun vadede fiyat kararlılığı da dikkate alındığında hidrojen gazının ekonomik bir şekilde kömürden elde edilebileceği açıkça görülmektedir. Kömürden hidrojen üretiminde birçok yöntem olmakla birlikte en çok kullanılan yöntem gazlaştırma olup, çok yüksek çalışma sıcaklığı (yaklaşık 800°C) ve basıncı (1-100 atm), SO_x ve NO_x gibi zararlı kirleticilerin ortaya çıkması, ürün gazlarını ayırma ve saflaştırma ihtiyacının maliyeti artırması gibi bazı dezavantajlara sahiptir [7]. Elektrokimyasal yöntem kullanılması, bu gibi olumsuzlukları en aza indirmektedir.

Elektroliz yönteminde kaynak olarak kömür kullanılması, suyun elektrolizi ile hidrojen üretimine göre termodinamik açıdan da daha tercih edilebilir bir yöntemdir. Suyun elektrolizi için teorik olarak 1,23 V potansiyel gerekirken, kömür elektrolizi için teorik potansiyel 0,21 V'tur. Fakat yapılan deneysel çalışmalar incelendiğinde bu işlem için hücre potansiyelinin 0,75-1,00 V arasında değiştiği, yani teorik potansiyele göre daha yüksek potansiyelde gerçekleştiği, ama yine de suyun elektrolizine göre daha düşük potansiyel gerektirdiği gözlenmiştir [8]. Bu da hidrojen üretiminde daha az enerji gereksinimi ve birim maliyeti daha ekonomik hidrojen anlamına gelmektedir. Maliyeti düşürücü etkisinin yanı sıra suyun elektrolizinden daha yüksek verime sahip olduğu [9,10], demineralizasyon ve desülfürizasyon gibi kömürün saflaştırılmasına da etkisi olduğu bilinmektedir [11,12].

Kömür elektrolizinde temel olarak, kömür içerisindeki karbonun suyun oksijeni ile oksidasyonu, bu esnada suyun hidrojeninin kazanılması şeklinde elektrokimyasal bir süreç gerçekleşmektedir. Kömür-su karışımlarına 1 V'luk potansiyel uygulandığında anot ve katot bölgesinde redoks mekanizması aşağıdaki gibi olmaktadır [8,13].



İşlem sonucu katot bölgesinden hidrojen saf olarak elde edilebilmektedir. Anot bölgesinden ise karbon dioksit gazı çıkmaktadır. Bölmeleri birbirinden bir membran yardımı ile ayrılmış elektroliz hücreleriyle anot ve katot bölmelerinde oluşan gazlar birbirine karışmadan elde edilebilmektedir. Saf hidrojen elde etmenin yanı sıra, anot bölgesinden saf halde karbon dioksit de elde edilebilmesi yöntemin bir diğer avantajı olarak gösterilebilir. Aynı zamanda kömürleşme derecesine bakılmaksızın, düşük kömürleşme derecesine sahip kömürlerin de kullanılabilmesi bakımından oldukça uygun bir yöntemdir. Bu şekilde antrasit, taş kömürü gibi kömürlere kıyasla, ısı değeri nispeten düşük olduğu için çoğu uygulamada tercih edilmeyen linyit gibi genç kömürlerin verimli bir şekilde değerlendirilmesi mümkün olmaktadır. Bu bağlamda yapılan çalışmada düşük kömürleşme derecesine sahip Çanakkale/Çan bölgesinin linyitleri elektroliz deneyleri için seçilmiştir.

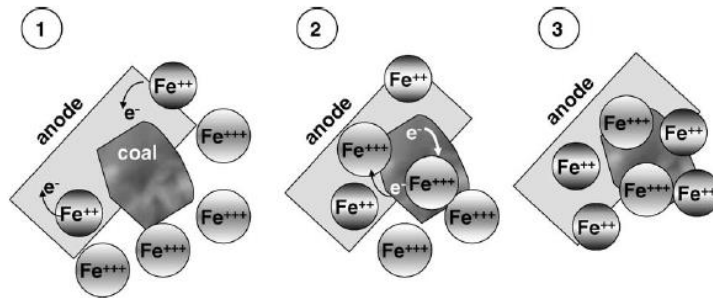
Karbon destekli elektroliz ile suyun elektrolizi arasında enerji gereksinimi bakımından kıyaslama yapılmış, karbon destekli elektrolizde gerekli enerjinin bir kısmının karbonun kimyasal enerjisinden karşılandığı

belirtmiştir. Suyun elektrolizi için gereken enerjinin yaklaşık %60'ının karbon kaynağından sağlanabileceği, böylelikle daha ekonomik hidrojen üretiminin mümkün olabileceği belirtilmiştir [14].

Halâ gelişmekte olan bir teknoloji olan kömür elektrolizi yöntemi ile ilgili yapılan çoğu çalışmada, katalitik aktivitesinin ve korozyon direncinin yüksek, ve uzun ömürlü olması bakımından katotta elektrot malzemesi olarak Pt kullanıldığı belirtilmektedir [8,15,16]. Pt'in yanı sıra Pt-Ir kullanıldığında yüksek akım yoğunluğu elde edilebildiği belirtilmiştir [17-19]. Ancak Pt gibi elektrot malzemelerinin dezavantajı diğer malzemelere oranla daha pahalı olmasıdır ve bu nedenle pahalı elektrotların kullanıldığı elektroliz ile hidrojen üretimi sistemlerinde maliyet probleminin önüne geçilememektedir. Pt yerine göreceli olarak daha ucuz Cu ve Zn gibi elektrot malzemelerin kullanımıyla olası maliyet probleminin de önüne geçilmesi mümkündür.

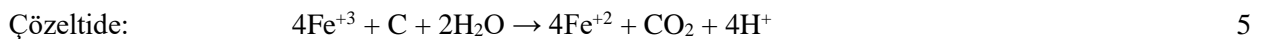
Kömür elektrolizi ile ilgili yapılan çalışmalarda elektrolit olarak çoğunlukla sülfürik asit (H_2SO_4) kullanılmıştır [8,16,20,21]. H_2SO_4 'in yanı sıra fosforik asitin (H_3PO_4) de elektrolit olarak kullanıldığı çalışmalar mevcut olmakla birlikte, H_3PO_4 'in H_2SO_4 'e göre performansının az olduğu belirtilmektedir [8]. Kömür elektrolizi yönteminde bir başka parametre olan kömür partikül boyutunun küçük olmasının elektroliz verimini artırıcı etkisi olduğu bilinmektedir [8]. Yüksek sıcaklıklarda çalışmanın ($80^\circ C$) kömür partiküllerinin elektrolizinde akım yoğunluğunu artırıcı etkisi olduğu belirtilmektedir [16].

Kömür elektrolizinde dikkat çeken bir parametre de reaksiyon üzerinde katalitik etkisi olan katkı maddelerinin kullanımıdır. Kömür elektrolizi düşük voltajda gerçekleşen bir süreç olduğu için, oksidasyon hızı düşük voltajdan dolayı azalmakta, bu durum gerçekleşmesi beklenen reaksiyonu yavaşlatmaktadır. Düşük voltajda oksidasyon hızını artırabilmek amacıyla çeşitli katalitik etkili katkı maddeleri ($Mn^{3+/2+}$, $Ce^{4+/3+}$, $Fe^{3+/2+}$, I^-/I , $V^{5+/3+}$) kullanılmaktadır [22]. Kullanılan katalitik etkili katkı maddeleri, kömür ve anot yüzeyi arasındaki iyonların taşınmasını sağlamaktadır. Anot yüzeyinde yükseltgenen katalitik etkili katkı maddesi, yükseltgenmiş haliyle ana reaksiyona katılarak oksidasyon hızını artırmaktadır. Yapılan çalışmalarda kömür elektrooksidasyonu için katalitik etki çoğunlukla Fe^{2+}/Fe^{3+} ve Ce^{4+}/Ce^{3+} iyonlarının çözeltiye eklenebilmesiyle sağlanmakta ve bu iyonların elektroliz hücresindeki ortalama akım yoğunluğunu önemli ölçüde artırdığı belirtilmektedir [17,18,23]. Patil ve çalışma grubu tarafından Fe^{2+}/Fe^{3+} iyonlarının varlığında kömür elektrolizinde gerçekleşen reaksiyon mekanizmasının şematik gösterimi Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Fe^{2+}/Fe^{3+} varlığında kömür elektrolizinde gerçekleşen reaksiyon mekanizmasının şematik gösterimi [17]

Fe^{2+}/Fe^{3+} iyonları çözeltiye eklendiğinde sırasıyla anotta Fe^{2+} iyonlarının yükseltgendiği, kömür yüzeyinde Fe^{3+} iyonlarının Fe^{2+} 'ye indirgendiği ve kömürün oksidasyonuna katıldığı belirtilmektedir. Gerçekleştiği düşünülen reaksiyonlar aşağıda belirtilmiştir.



Literatür incelendiğinde kömür elektrolizinin hidrojen üretiminde suyun elektrolizine ekonomik açıdan bir alternatif olarak 1980'lerden günümüze kadar araştırıldığı görülmektedir. Kömürün bolca bulunabilmesi ve kolay temin edilebilmesinin yanı sıra esasen yapısındaki karbon elementinin sahip olduğu kimyasal enerjinin ve elektriksel olarak sahip olduğu özelliklerinin, elektrokimyasal proseslerde önem arz ettiği söylenebilir. Yapılan çalışmalarda kömür-su karışımlarının elektrolizi ile hidrojen üretiminin mümkün olduğu görülebilmektedir. Fakat kömür-su karışımlarının elektrolizi ile ilgili çalışmaların genelinden de

anlaşılabileceği üzere hidrojen üretim sürecini etkileyen birçok parametre mevcuttur. Elektrot malzemesi, sıcaklık, pH, elektroliz ortamına eklenen katalitik etkili katkı maddelerinin etkisi, çözelti konsantrasyonu, yapılan çalışmalarda etkisi incelenen parametrelerden birkaçıdır. Parametrelerin fazla olması sebebiyle konu çok geniş kapsamlı olup hala araştırılması ve açığa çıkarılması gereken birçok eksiklik mevcuttur. Literatürde konuyla ilgili yapılan çalışmalarda çoğunlukla Pt, Pd gibi pahalı elektrot malzemelerinin kullanımına rastlanmıştır [8,15,16]. Yapılan araştırmalarda Cu ve Zn gibi nispeten daha ekonomik elektrot malzemelerinin kömür elektrolizinde kullanıldığı bir çalışma ile karşılaşılmamıştır. Bu bakımdan yapılan çalışmanın daha ekonomik elektrot malzemeleri ile kömür elektrolizinin gerçekleştirilebilmesi açısından literatürdeki benzer çalışmalardan farklı bir yönü vardır.

Ayrıca literatürdeki çalışmalarda genellikle kömürleşme derecesi daha yüksek kömürlerle ve grafit gibi saf karbon içerikli malzemelerle çalışıldığı görülmektedir [19]. Ülkemizde mevcut kömürler ise genel olarak düşük ısı değere sahiptir. Dolayısıyla mevcut ulusal kömürlerimizin yakılarak kullanılması yerine katma değeri yüksek hidrojen eldesinde kullanılarak daha etkili ve değerli bir hale getirilmesi mümkün olmaktadır. Bu nedenle yapılan çalışmada elektroliz ile hidrojen üretimi için genç kömürlerimizden Çan linyiti seçilmiştir.

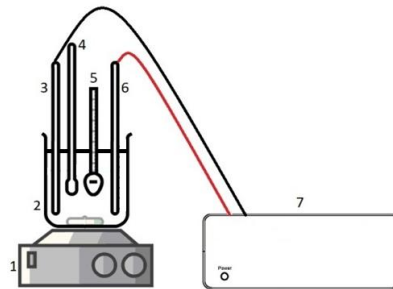
Çalışmada kullanılan Çan linyiti kömürleşme süreci açısından genç sayılan bir kömürdür ve çoğu endüstriyel uygulamada ısı değerinin düşüklüğünden dolayı tercih edilmemektedir. Yapılan çalışma ile Çan linyitinin hidrojen gibi değerli bir ürünün elde edilmesi amacıyla kullanılabilirliği görülmüştür. Çan linyitinin analizi [24] ve içerisindeki sabit karbon yüzdesi dikkate alınırse elektroliz hücresinin %100 verimle çalıştığı varsayımı yapılarak basit bir stokiometrik hesap ile 1 kg Çan linyitinden teorik olarak 2,14 L H₂ üretilebilmektedir. Bahsedilen tüm noktalar göz önünde bulundurulduğunda, yapılan bu çalışma, çoğu endüstriyel uygulamada tercih edilmeyen Çan linyiti gibi düşük ısı değerli başka kömürlerin de elektroliz ile hidrojen üretiminde kullanılabilirliğini göstermesi açısından önem arz etmektedir.

Edinilen bilgiler ışığında bu çalışmada Çanakkale/Çan linyitinin elektrolizi ile hidrojen üretimine yönelik çeşitli parametrelerin (kömür partikül boyutu, elektrot malzemesi, çözelti sıcaklığı, çözelti karıştırma hızı ve çözeltiye eklenen katalitik etkili katkı maddesi) akım yoğunluğuna etkileri incelenerek, hidrojen üretimi için belirtilen parametrelere bağlı, çalışılan koşullardaki optimum hidrojen üretim şartlarıyla ilgili bir yaklaşım elde edilmiştir.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL AND METHODS)

Deneyler, uçları güç kaynağına bağlanmış iki elektrotlu (anot/katot) 0,25 L'lik basit elektroliz hücresinde gerçekleştirilmiştir (Şekil 2). Çalışmada kömür partikül boyutu (1,0-0,5 mm, 0,50-0,25 mm ve 0,25 mm), sıcaklık (20°C-80°C), karıştırma hızı (0, 240, 480 rpm), elektrot malzemesi (bakır/bakır (Cu/Cu) ve çinko/çinko (Zn/Zn)) ve Fe²⁺ (Fe²⁺/Fe³⁺) iyonunun etkisi incelenmiştir.

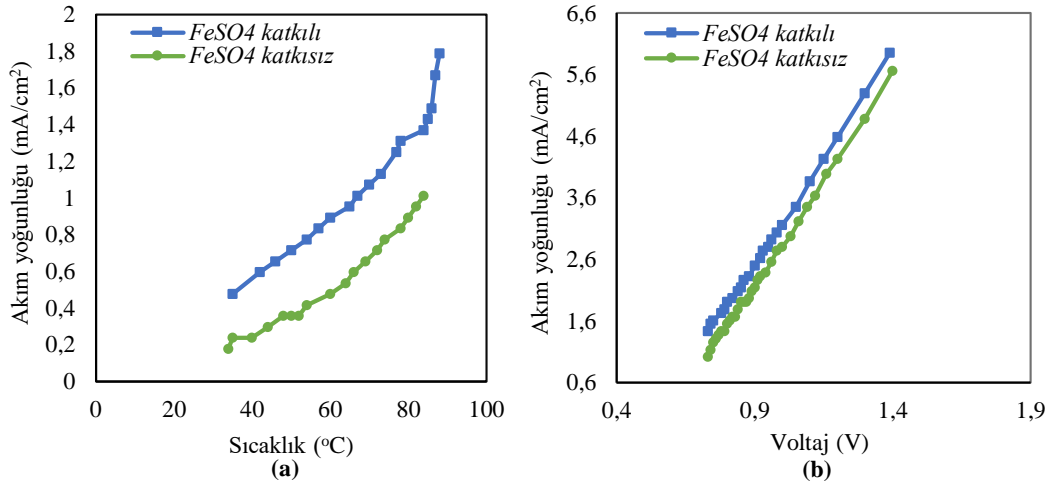
Her deneyde sabit 10 g Çan kömürü kullanılmıştır. Karıştırma hızı ve sıcaklık parametrelerinin incelenmesi amacıyla elektroliz hücresi ısıtıcı manyetik karıştırıcı (VELP Scientifica, ARE) üzerine yerleştirilmiştir. Tüm deneylerde asidik ortamda çalışılmış ve asit ortamı 1 M H₂SO₄ (Merck, %95-97 H₂SO₄) ile oluşturulmuştur. Elektrot malzemesinin akım yoğunluğuna etkisini belirleyebilmek için Cu/Cu ve Zn/Zn elektrotlar kullanılmış, her iki malzemede de elektrotlar arası mesafe 5 cm olarak sabit tutulmuştur. Elektrotların uçlarına bağlanan güç kaynağı (GW Instek, PSP-405) ile uygulanan voltaja karşı akım yoğunluğu ölçülmüştür.



Şekil 2. Deney sistemi (1:ısıtıcı manyetik karıştırıcı, 2: elektroliz hücresi, 3: katot elektrodu, 4:pH metre, 5:termometre, 6: anot elektrodu, 7:güç kaynağı)

3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Literatürden edinilen bilgiler ışığında kömür elektrolizinde Fe^{+2}/Fe^{+3} kullanımının akım yoğunluğuna etkisini belirleyebilmek amacıyla kömür-su karışımına 5 mL 0,1 M $FeSO_4$ (Chem Pure, $FeSO_4 \cdot 7H_2O$) çözeltisi eklenmiştir. Anotta ve katotta Cu elektrot kullanılmış olup, aktif elektrot yüzey alanı $16,8 \text{ cm}^2$ 'dir. Kömür-su karışımlarına 0,73 V sabit voltaj uygulanmıştır. Sabit voltaj altında sıcaklık artışına bağlı elde edilen akım yoğunluğu değerlerinin değişimi (Şekil 3a) ve 80°C sabit sıcaklıkta voltaj artışına bağlı akım yoğunluğu değerlerinin değişimi (Şekil 3b), Fe^{+2}/Fe^{+3} katkılı sistemdeki verilerle birlikte gösterilmiştir.



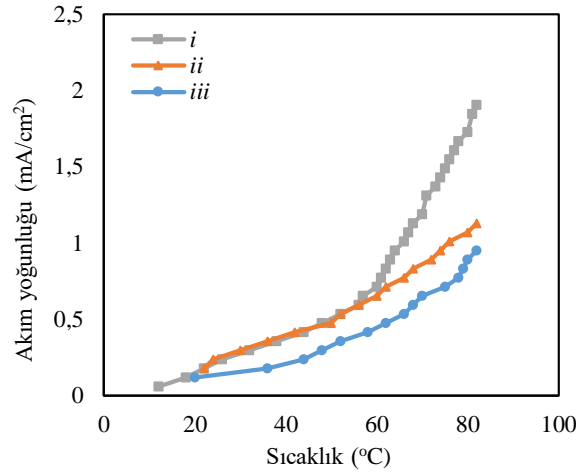
Şekil 3. (a) $FeSO_4$ katkılı/katkısız kömür-su karışımlarının 0,73 V'da sıcaklık artışına bağlı akım değerlerinin değişimi, (b) $FeSO_4$ katkılı/katkısız karışımın 80°C 'de voltaj artışına bağlı akım değerlerinin değişimi

Yapılan deneylerde kömür-su karışımının elektrolizinde Fe^{+2}/Fe^{+3} iyon eklentisinin akım yoğunluğunu artırıcı yönde etkisi olduğu açıktır. 0,73 V sabit voltajda 80°C 'de Fe^{+2}/Fe^{+3} katkısı ile akım yoğunluğu %33 artmıştır. Bu anlamda elde edilen sonuçlar literatür ile uyum göstermektedir [18].

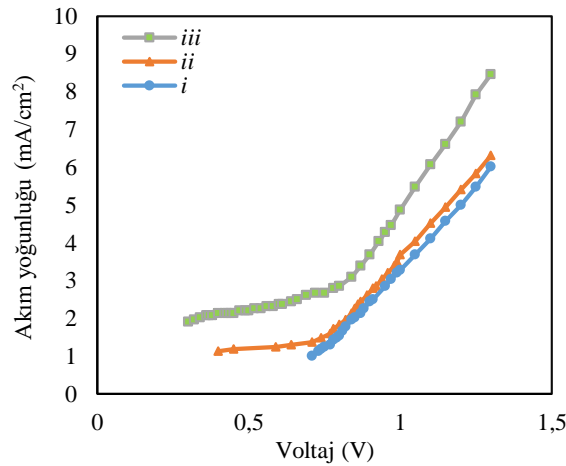
Çalışmada incelenen diğer parametreler (kömür partikül büyüklüğü, sıcaklık, karıştırma hızı, elektrot malzemesi) için Fe^{+2}/Fe^{+3} iyonunun akım yoğunluğuna pozitif etkisi kanıtlandığından diğer parametre deneyleri kömür-su karışımına $FeSO_4$ katkısı ile yürütülmüştür.

Kömür partikül boyutunun akım yoğunluğuna etkisini belirleyebilmek amacıyla üç farklı boyutta (1,0-0,5 mm, 0,50-0,25 mm, <0,25 mm) kömür parçacıkları kullanılmıştır. Anot ve katot elektrot malzemesi olarak Cu kullanılan deneyler, kömür elektrolizinde akım yoğunluğuna pozitif etkisi olduğu bilinen katalitik etkili $FeSO_4$ katkısı eklenerek yürütülmüştür. Deneylerde, harcanan enerjiyi minimumda tutabilmek için akım elde edilebilen en düşük potansiyelde çalışılmıştır. Farklı partikül boyutları için akım elde edilebilen potansiyel değeri değişmektedir. Partikül boyutu arttıkça uygulanması gereken potansiyel değerinin de arttığı görülmüştür. 1,0-0,5 mm partikül boyutu için 0,7 V, 0,50-0,25 mm partikül boyutu için 0,4 V, <0,25 mm partikül boyutu için 0,3 V sabit voltajda çalışılmıştır. Üç farklı partikül boyutunda sabit voltaj altında sıcaklık artışına bağlı elde edilen akım yoğunluğu değerlerinin değişimi Şekil 4'te, 80°C sabit sıcaklıkta voltaj artışına bağlı akım yoğunluğu değerlerinin değişimi ise Şekil 5'te gösterilmektedir.

Şekil 4'ten görülebileceği gibi amaç, partikül boyutunun sabit voltajda sıcaklık artışına bağlı akım yoğunluğuna etkisini eğilim olarak incelemek olmuştur. Yüksek voltajlar ekonomik açıdan tercih edilmediği için her bir partikül boyutu için akım elde edilebilen en düşük voltajda çalışılmıştır (Şekil 4). Partikül boyutu küçüldükçe daha düşük voltajda akım elde edilebilmektedir ve bu durum literatürle uyumludur [8]. Örneğin; 1,0-0,5 mm partikül boyutu için akım elde edilebilen voltaj 0,7 V iken, 0,50-0,25 mm partikül boyutu için akım elde edilebilen voltaj 0,4 V olmaktadır. Bu nedenle her bir partikül boyutu için çalışılan voltajlar da farklı olmuştur.



Şekil 4. Farklı partikül boyutlarına göre sabit voltajda sıcaklık artışına bağlı akım değerlerinin değişimi, (i) Partikül boyutu: 1,0-0,5 mm, 0,7 V, (ii) Partikül boyutu: 0,50-0,25 mm, 0,4 V, (iii) Partikül boyutu: <0,25 mm, 0,3 V



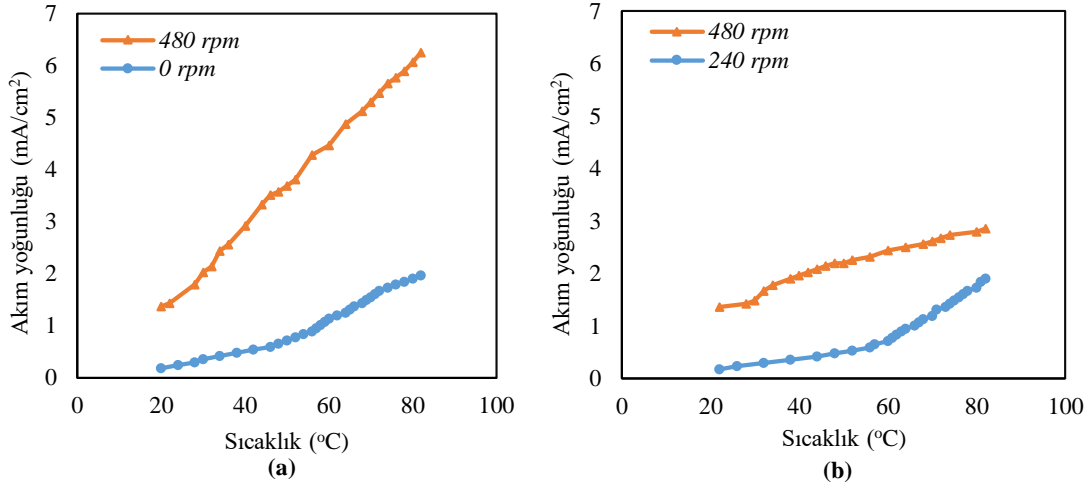
Şekil 5. Farklı partikül boyutlarına göre 80°C sabit sıcaklıkta voltaj artışına bağlı akım yoğunluğu değerlerinin değişimi, (i) Partikül boyutu: 1,0-0,5 mm, (ii) Partikül boyutu: 0,50-0,25 mm, (iii) Partikül boyutu: <0,25 mm

Kömür partikül boyutunun küçük olmasının elektroliz verimini artırıcı etkisi olduğu bilinmektedir [8]. Yapılan deneyler de küçük partikül boyutunun akım yoğunluğunu artırıcı etkisi olduğunu gösterir niteliktedir. Partikül boyutunun küçülmesi ile daha geniş bir yüzey alanı elde edilmesi ve hücrede oluşan dirençlerin azalmasına bağlı olarak akım yoğunluğunun artış göstermiştir.

Karıştırmanın ve karıştırma hızının kömür elektrolizinde akım yoğunluğuna etkisini belirlemek amacıyla kömür-su karışımı hiç karıştırmanın olmadığı, 240 ve 480 rpm karıştırma hızlarında elektroliz işlemi gerçekleştirilmiştir. Anot ve katotta 16,8 cm² aktif yüzey alanlı Cu elektrot kullanılmış ve katkı maddesi olarak FeSO₄ eklenmiştir. Partikül boyutu ile ilgili yapılan deney sonuçlarına dayanarak karıştırma hızının etkisi <0,25 mm partikül boyutundaki kömür parçacıkları ile yürütülmüştür. Sabit voltaj altında farklı karıştırma hızlarında sıcaklık artışına bağlı elde edilen akım yoğunluğu değerlerinin değişimi Şekil 6'da verilmiştir.

Karıştırma hızının artması ile elde edilen akım yoğunluğu değerlerinin arttığı bilinmektedir. Hiç karıştırmanın olmadığı durumda akım elde edilebilen en düşük voltaj değeri, karıştırma yapıldığındaki voltaj değerine göre daha yüksek olmaktadır. İşlemlerde kullanılan elektrik enerjisini minimumda tutabilmek adına mümkün olan en düşük voltajda çalışılmak istenmiştir. Karıştırma etkisinin belirlenmesi amacıyla 0 ve 480 rpm hızları kendi aralarında, karıştırma hızının etkisinin belirlenmesi amacıyla ise 240 ve 480 rpm hızları ayrıca kendi aralarında değerlendirilmiştir. Şekil 6a'da karıştırma etkisinin belirlenmesi

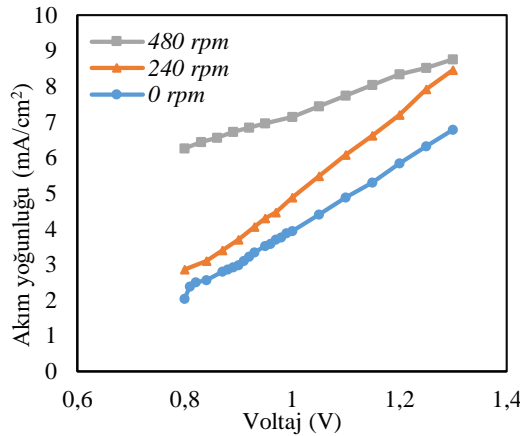
amacıyla 0 ve 480 rpm hızlarında akım değerleri ölçülerek hesaplanan akım yoğunluğu değerleri görülmektedir. Şekil 6b’de ise karıştırma hızının etkisinin belirlenmesi amacıyla 240 ve 480 rpm hızlarında yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar verilmiştir.



Şekil 6. Sabit voltaj altında farklı karıştırma hızlarında sıcaklık artışına bağlı akım yoğunluğu değerlerinin değişimi, (a)0 rpm-480 rpm, 0,8 V, (b)240-480 rpm, 0,3 V

Kömür partikülleri su ile homojen bir karışım oluşturmadığından karıştırma yapılmadığında hücrede kütle aktarım direnci meydana gelmektedir [25]. Karıştırma sağlanması ile hücrede meydana gelen bu dirençler olabildiğince azaltılmaktadır. Şekil 6a söz konusu durumu destekler nitelikte bir sonuçtur. Karıştırma hızının artmasıyla ise dirençler minimize edilebilir ve hızın artmasıyla direnç azaldığı için akım yoğunluğu artmıştır (Şekil 6b). Ancak 480 rpm üzerinde hücrede girdap oluşumu gözlemlendiğinden daha yüksek karıştırma hızları tercih edilmemiştir.

80°C sabit sıcaklıkta voltaj artışına bağlı akım yoğunluğu değerlerinin değişimi ise Şekil 7’de gösterilmektedir. Şekilden de görüldüğü üzere, karıştırma hızının artmasıyla elde edilen akım yoğunluğu değerleri de artış göstermiştir. Bu durum, elektroliz hücresindeki kömür-su karışımının karıştırma hızının artmasıyla kütle aktarım direncinde meydana gelen azalmadan dolayı, kömür partikülleri ile anot yüzeyi arasındaki etkileşimin artmasının bir sonucudur. Bu etkileşimin artması ise karıştırma hızına bağlı olarak akım yoğunluğunun artmasıyla sonuçlanmaktadır [25].

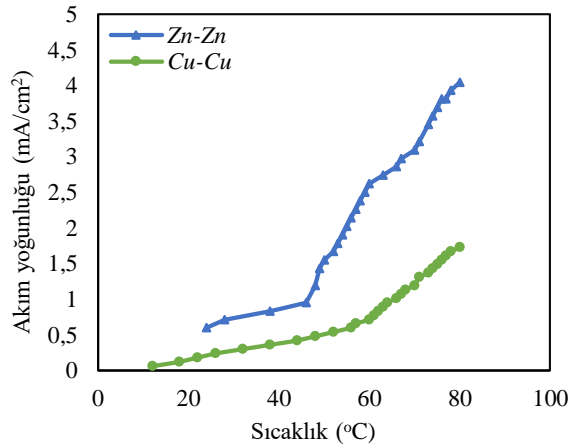


Şekil 7. Farklı karıştırma hızlarına göre 80°C sabit sıcaklıkta voltaj artışına bağlı akım yoğunluğu değerlerinin değişimi

Şekil 7’den görülebileceği gibi 0 rpm ve 240 rpm karıştırma hızlarında 80°C sabit sıcaklıkta voltaj artışına bağlı akım yoğunluğu değerlerinin artışı 480 rpm’e göre daha yüksek bir eğilim göstermektedir. Ancak çalışmanın amacına uygun olarak kullanılan enerjiyi minimumda tutabilmek adına mümkün olan en düşük

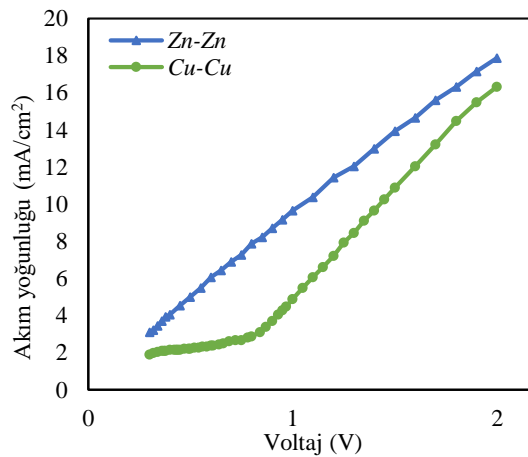
voltajda çalışmak tercih edilmelidir. Yapılan işlem suyun elektrolizi ile kıyaslandığında; suyun elektrolizinde teorik voltaj olan 1,23 V değerinin aşılması, enerji verimliliği açısından istenen bir durum değildir. Bu bağlamda Şekil 7 incelendiğinde, 0 ve 240 rpm karıştırma hızlarındaki akım yoğunluğu eğrileri, voltaj artışına bağlı daha dik bir eğilim gösterse de, 1,23 V altındaki voltaj değerlerinde 480 rpm karıştırma hızında elde edilen değerlerin enerji verimliliği bakımından daha uygun olduğu görülmektedir.

Anot ve katotta Cu elektrot kullanılarak gerçekleştirilen fiziksel parametre deneylerinde (Fe^{+2}/Fe^{+3} katkısı, partikül boyutu, karıştırma hızı) en yüksek akım yoğunluğu değerleri Fe^{+2}/Fe^{+3} lü ortamda, <0,25 mm partikül boyutunda ve 480 rpm karıştırma hızında elde edilmiştir. Bu şartlarda elektrolizde akım yoğunluğuna elektrot malzemesinin etkisinin belirlenebilmesi için Cu/Cu yerine aynı koşullarda Zn/Zn elektrot kullanılarak deneyler yapılmıştır. Cu ve Zn elektrodun elektroliz performanslarını karşılaştırabilmek adına Cu elektrot ile yapılan deneylerdeki tüm parametreler sabit tutulmuştur (çözelti miktarı, elektrolit miktarı, $FeSO_4$ katkısının miktarı, elektrotlar arası mesafe). Anotta ve katotta kullanılan Zn elektrodun aktif elektrot yüzey alanı $8,4 \text{ cm}^2$ 'dir. Cu elektrotlu sistem ile verileri karşılaştırabilmek adına Zn elektrot için de <0,25 mm partikül boyutlu kömür-su karışımlarına 0,3 V sabit voltaj uygulanmıştır. Her iki elektrot malzemesi için 0,3 V sabit voltaj altında sıcaklık artışına bağlı elde edilen akım yoğunluğu değerlerinin değişimi Şekil 8'de ve 80°C sabit sıcaklıkta voltaj artışına bağlı akım yoğunluğu değerlerinin değişimi ise Şekil 9'da karşılaştırmalı olarak verilmektedir.



Şekil 8. 480 rpm karıştırma ortamında 0,3 V sabit voltaj altında sıcaklık artışına bağlı akım değerlerinin elektrot malzemesine göre değişimi

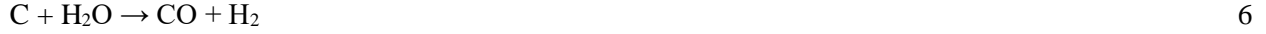
Sıcaklığın artması ile Cu elektrot kullanılan deneylerde olduğu gibi Zn elektrotlu deney sisteminde de akım yoğunluğu değerleri artmaktadır. Karşılaştırma yapıldığında, Zn elektrot kullanıldığında Cu elektroda göre 80°C sabit sıcaklıkta akım yoğunluğu değerleri 2,3 katına çıkmaktadır.



Şekil 9. 480 rpm karıştırma ortamında 80°C 'de voltaj artışına bağlı akım yoğunluğu değerlerinin elektrot malzemesine göre değişimi

Her iki elektrotta da voltaj artışına bağlı akım yoğunluğunun artmasıyla birlikte, Zn elektrot kullanıldığında, örneğin 1 V için akım yoğunluğu değerleri Cu elektroda göre 2 kat daha fazladır (1 V için; Cu elektrotta 4,88 mA/cm², Zn elektrotta 9,64 mA/cm²).

Yapılan çalışma bir ön çalışma olduğu için kömürün içerisindeki diğer organik ve özellikle inorganik bileşenlerin olası etkileri dikkate alınmamıştır. Ancak karbonlu bileşiklerin haricinde kullanılacak kömürün yapısında bulunan diğer bileşiklerden kaynaklı farklı ürünler de oluşabilir. Voltaj değişikliğine bağlı olarak gerçekleşebilecek reaksiyonlar aşağıda verilmiştir:



Gerçekleşebilecek reaksiyonların Gibbs serbest enerjileri sırasıyla kJ/mol cinsinden; 99,74, 173,88, 525,54 ve 561,03 olup, teorik hücre potansiyelleri V cinsinden; 0,52, 0,45, 1,36 ve 1,45'dir. Anot bölgesinde voltaj değişikliğine bağlı olarak reaksiyonlarda belirtilen ürün gazlarının çıkma olasılığı vardır. Ancak Eşitlik 8 ve 9 ile gösterilen reaksiyonların gerçekleşebileceği yüksek voltaj değerlerine çıkılması tercih edilmediğinden bu reaksiyonlarda belirtilen ürün gazlarının çıkması olası değildir. Bu çalışmanın sonraki aşamalarında anot bölgesinden çıkan gazların analizleri yapılarak bu öngörülerin ne kadar gerçekleştiği ayrıca incelenecektir.

4. SONUÇ (CONCLUSION)

Hidrojen üretiminde yüksek saflık açısından en uygun yöntem olan elektrolizde kaynak olarak kömür kullanımı ile, yöntemdeki maliyet ve yüksek enerji gereksinimi problemi aşılabilmektedir. Çünkü elektroliz işlemi için gereken enerjinin %60'ı karbon kaynağından yani kömürden sağlanabilmektedir [14]. Kömür elektrolizinde işlemi etkileyen birçok parametre bulunmaktadır. Yapılan çalışmada sıcaklık, Fe⁺²/Fe⁺³ iyonunun katkısı, kömür partikül boyutu, karıştırma hızı ve elektrot malzemesi parametrelerinin elektroliz işleminden elde edilen akım yoğunluğuna etkileri incelenmiştir. Çan kömürünün elektrolizi için farklı parametreler ile, akım yoğunluğuna bağlı hidrojen üretimine yönelik literatüre uygun bir yaklaşım ile, çalışmalar yürütülmüştür. Akım yoğunluğunun hidrojen üretimi ile doğrudan bağlantılı olduğu düşünülürse, bahsedilen elektroliz hücresi için en yüksek hidrojen üretim verimine Zn/Zn elektrot kullanıldığında, yüksek sıcaklıkta, Fe⁺²/Fe⁺³ katkılı ortamda, küçük partikül boyutunda ve yüksek karıştırma hızında ulaşılmaktadır. Elde edilen sonuçlar literatürde benzer çalışmalarla uyumluluk göstermektedir [8,16]. Bununla beraber, literatürde yapılan çalışmalarda kullanılan Pt gibi pahalı elektrot malzemelerine kıyasla daha ekonomik olan Cu ve Zn'nun elektrot malzemesi olarak kullanılabilmesi görülmüştür. Ayrıca, kömürleşme süreci açısından genç sayılan bir kömür olan Çan linyiti ısı değeri nispeten düşük bir kömürdür ve bu sebeple kullanım alanı kısıtlıdır. Yapılan çalışmada olduğu gibi, genç kömürlerin bu tip uygulamalarda değerlendirilmesiyle oldukça verimli sonuçlar elde edilebilmektedir. Farklı kömür tipleri, farklı elektrot malzemeleri, farklı elektrolit ortamlarında daha fazla çalışma yapılarak elde edilen sonuçlar geliştirilebilir ve düşük maliyetli hidrojen üretimi konusuna büyük katkılar sağlanabilir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışma Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi (Proje No: 06/2019-03) tarafından desteklenmiştir. Katkılarından dolayı Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne teşekkürlerimizi sunarız.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Peavey, M.A. (2002). *Fuel From Water: Energy Independence With Hydrogen* (10th Edition). Merit Products Inc., 10.
- [2] Momirlan M., Veziroğlu T.N. Current Status of Hydrogen Energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 6 (141-179), (2002).
- [3] Santos, D. M. F., Sequeira, C. A. C. Hydrogen production by alkaline water electrolysis. *Quimica Nova*, 36 (8) (1176-1193), (2013).
- [4] Manabe, A., Kashiwase, M., Hashimoto, T., Hayashida, T., Kato, A., Hirao, K., Shimomura, I., Nagashima, I. Basic study of alkaline water electrolysis. *Electrochimica Acta*, 100 (249-256), (2013).
- [5] Zeng K, Zhang D.K. Recent progress in alkaline water electrolysis for hydrogen production and applications. *Progress in Energy and Combustion Science*, 36 (307-326), (2010).
- [6] Massood, R., Stiegel, G. J. Hydrogen from coal gasification: an economical pathway to a sustainable energy future. *International Journal of Coal Geology*, 65 (173-190), (2005).
- [7] Steinberg, M., Cheng, H.C. Modern and prospective technologies for hydrogen production from fossil fuels, in T. N. Veziroğlu and A. N. Protsenko (eds.). *Hydrogen Energy Progress VII*, 2 (699-740), (1988).
- [8] Coughlin, R. W., Farooque, M. Consideration of electrodes and electrolytes for electrochemical gasification of coal by anodic-oxidation. *Journal of Applied Electrochemistry*, 10 (729-740), (1980).
- [9] Coughlin, R.W., Farooque, M. Hydrogen production from coal, water and electrons. *Nature*, 279 (301-303), (1979).
- [10] Farooque, M, Coughlin, R.W. Anodic coal reaction lowers energy consumption of metal electrowinning. *Nature*, 280 (666-668), (1979).
- [11] Gong, X.Z., Wang, M.Y., Wang, Z., Guo, Z.C. Desulfurization of electrolyzed coal water slurry in HCl system with ionic liquids addition. *Fuel Process Technology*, 99 (6-12), (2012).
- [12] Lam, V., Li, G.C., Song, C.J., Chen, J.W., Fairbridge, C., Hui, R., Zhang, J.J. A review of electrochemical desulfurization technologies for fossil fuels. *Fuel Process Technology*, 98 (30-38), (2012).
- [13] Jin X, Botte, G.G. Feasibility of hydrogen production from coal electrolysis at intermediate temperatures. *Journal of Power Sources*, 171 (826-834), (2007).
- [14] Giddey, S., Kulkarni, A., Badwal, S.P.S. Low emission hydrogen generation through carbon assisted electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40 (70-74), (2015).
- [15] Becker, M. R., De Souza, M. O., De Souza, R. F., Fiegenbaum, F., Martini, E. M. A. Electrocatalytic activities of cathode electrodes for water electrolysis using tetra-alkyl ammonium-sulfonic acid ionic liquid as electrolyte. *Journal of Power Sources*, 280 (12-17), (2015).
- [16] Abreu, Y.D., Patil, P., Marquez, A.I., Botte, G.G. Characterization of electrooxidized Pittsburgh no.8 coal. *Fuel*, 12 (1-12), (2006).
- [17] Patil, P., Abreu, Y.D., Botte, G.G. Electrooxidation of coal slurries on different electrode materials. *Journal of Power Sources*, 158 (368-377), (2006).

- [18] Hesanova, A., Kınık, H. Titanyum ve karbon keçe üzerine platin ve platin/iridyum kaplama elektrodlarının kömür-su karışımlarının elektrolizindeki etkinliklerinin kıyaslanması. Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü e-dergi, 22 (1) (44-53), (2010).
- [19] Botte, G.G., Sahte, N. Assessment of coal and graphite electrolysis on carbon fiber electrodes. Journal of Power Sources, 161 (1) (513-523), (2006).
- [20] Hesanova, A., İçten, O., Meryemoğlu, B. Electrolysis of coal slurries to produce hydrogen gas: Effects of different factors on hydrogen yield. International Journal of Hydrogen Energy, 36 (12249-12258), (2011).
- [21] Gong, X., Guo, Z., Wanga, M., Wanga, Z. Roles of inherent mineral matters for lignite water slurry electrolysis in H₂SO₄ system. Energy Conversion and Management, 75 (431-437), (2013).
- [22] Aboushabana, M. R. (2012). Electrolysis of Coal and Carbon Slurry Suspensions, Doctor of Philosophy Thesis, The University of Texas at Arlington, Texas, USA,7.
- [23] Bockris, J. O., Later, D. W., Murphy, O. J. Products found in the anodic oxidation of coal. International Journal of Hydrogen Energy, 10 (453-474), (1985).
- [24] Gülen, J., Toprak, S., Pişkin, S. Batı Türkiye Kömürlerine Ait Bazı Karakteristik Özellikler, Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi, 2 (1) (27-33), (2012).
- [25] Santos, D.M.F., Sljuki, B., Sequeira, C.A.C., Maccio, D., Saccone, A., Figueiredo, J.L. Electrocatalytic approach for the efficiency increase of electrolytic hydrogen production: Proof-of-concept using platinum-dysprosium alloys. Energy, 50 (486-492), (2013).

Mini Gel Electrophoresis Control Software and System Design With Python

 Ahmet Reşit KAVSAOĞLU¹, İsmail MERSİNKAYA^{2,*}
¹Karabük University, Faculty of Engineering, Department of Biomedical Engineering, 78050, Center/KARABÜK

²Aydın Adnan Menderes University, Söke Vocational School, Department of Electronics and Automation, 09200, Söke/AYDIN

Graphical/Tabular Abstract

Article Info:

Research article

Received: 18/09/2019

Revision 12/11/2019

Accepted: 18/11/2019

Highlights

- Electrophoresis Power Supply.
- Python Control Interface.
- Embedded Systems

Keywords

 Python
 Control Software
 Mini Gel Electrophoresis
 Embedded System

In this study, it is aimed to increase the sensitivity of the analysis by minimizing the voltage fluctuation of the power supply during the electrophoresis process and the errors of the bands such as the bands overflowing out of the gel when the tester does not turn off the power supply in time; Control software, mini gel electrophoresis system design and application studies, which enable the devices used to operate in order of operation and the calculation operations can be performed automatically by a microprocessor and microcontroller interfaces.

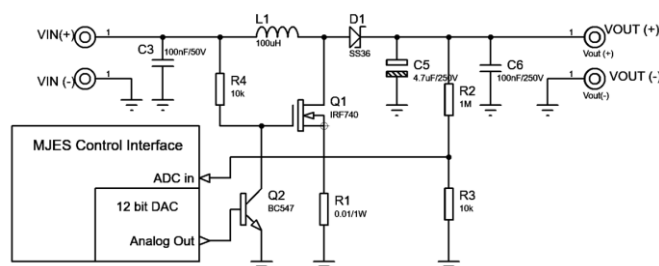


Figure A. DAC controlled power supply circuit diagram.

Purpose: In this study, control interface software and power supply control methods are developed and experiments are performed at different times and voltages. The number of experiments and the variety of applications were increased. The electrophoresis system variables given in the table are CLASSIC and MJES (Mini gel electrophoresis system).

Theory and Methods: In this study, fixed output voltage is generated in electrophoresis power supply with control software created with Python. For this purpose, Nixie power supply used as mini gel electrophoresis power supply was applied as test circuit. Instead of IRF644 mosfet and SS36 diode, DSEI12-06A diode with 35 ns switching time and 600 V voltage and IRF740 mosfet are used in the circuit. Tested with circuit control software.

Results: With this study, a new control system has been developed with interface software and automatic operation features by ensuring the adaptation of current technologies in gel electrophoresis process. The mini gel electrophoresis power supply controlled by the system has been created in a hardware structure compatible with many embedded system controllers and provided ease of use. Unlike classical gel electrophoresis system is designed and implemented as an integrated system. The band images in the formed mini gel were obtained by applying UV light and transferred to the electronic environment at the end of the process.

Conclusion: The control software created with Python and the power supply circuit controlled by this software have ensured that the voltage and time dependent values causing the mentioned effects to be kept constant throughout the process. Thus, unwanted effects such as smile curve, propagation, user control and band detection errors are prevented in the bands.



Python ile Mini Jel Elektroferez Kontrol Yazılımı ve Sistem Tasarımı

Ahmet Reşit KAVSAOĞLU¹, İsmail MERSİNKAYA^{2,*}

¹Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Biyomedikal Mühendisliği Bölümü, 78050, Merkez/KARABÜK

²Aydın Adnan Menderes Üniversitesi, Söke Meslek Yüksekokulu, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, 09200, Söke/AYDIN

Öz

DNA, RNA ve protein molekülleri gibi yüklü makro moleküllerin bir elektrik alan içerisinde (-) ve (+) yüklü kutuplar arasında bir kutuptan diğerine doğru hareket ettirilerek ayrıştırılması yöntemine elektroferez denir. Klasik elektroferez işleminde güç kaynağı, UV (morötesi) transillüminatör ve jel görüntüleme için kullanılan cihaz ve malzemeler, süreç kontrolü işlemleri birbirinden ayrı işlemler olarak ve deneyi yapan kişiler tarafından yapılmaktadır. Gülümseme etkisi (smile effect), yayılım etkisi ve diğer etkiler analizlerdeki hassasiyeti düşürebilmekte ve sonuçlar üzerinde hatalı band görüntüsü ve band yoğunluğu hesaplamasına neden olabilmektedir. Bu çalışma, elektroferez işlemi süresince güç kaynağının gerilim dalgalanmasından ve deneyi yapan kişilerin zamanında güç kaynağını kapatmadığında bandların jel dışına taşması gibi hataları en aza indirerek analiz hassasiyetini arttırmayı; kullanılan cihazların işlem sırasına göre çalışabilmesi ve hesaplama işlemlerinin otomatik olarak bir mikroişlemci ve mikrodenetleyici arabirimleri tarafından yapılabilmesini sağlayan kontrol yazılımı, mini jel elektroferez sistem tasarımı ve uygulama çalışmalarını içermektedir. Tasarlanan kontrol yazılımı ve klasik elektroferez ile yapılan işlemler karşılaştırıldığında olumlu sonuçlar elde edildiği görülmüştür.

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 18/09/2019
Düzeltilme: 12/11/2019
Kabul: 18/11/2019

Anahtar Kelimeler

Python
Kontrol Yazılımı
Mini Jel Elektroferez
Gömülü Sistem

Keywords

Python
Control Software
Mini Gel Electrophoresis
Embedded System

Mini Gel Electrophoresis Control Software and System Design With Python

Abstract

Electrophoresis is the method of separating charged macromolecules such as DNA, RNA and Protein molecules by moving them from one pole to the other, between (-) and (+) charged poles, in an electric field. In the classical electrophoresis process, devices and materials used for power supply, UV (ultraviolet) transilluminator and gel imaging, process control procedures are performed as separate processes and by the experimenters. Smile effect, diffusion effect and other factors may decrease the sensitivity in the analysis and may result in incorrect band image and band density calculation on the results. This study aims to increase the sensitivity of the analysis by minimizing the voltage fluctuation of the power supply during the electrophoresis process and the errors of the bands such as the bands overflowing out of the gel when the tester does not turn off the power supply in time; Control software, mini gel electrophoresis system design and application studies, which enable the devices used to operate in order of operation and the calculation operations can be performed automatically by a microprocessor and microcontroller interfaces. When the control software and classical electrophoresis processes were compared, positive results were obtained.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Biyomedikal cihazların günümüz teknolojilerine uyumlu olarak geliştirilmesi ile biyomedikal mühendisliği alanında verimli ve sistematik çalışmalar yapılabilmektedir. Özellikle laboratuvar analiz çalışmalarında kullanılan cihazların hassasiyetleri ve kararlı analizler yapabilmesi deneysel çalışmaların değerlendirilmesi açısından oldukça önemlidir.

Parça büyüklüğü analizleri için mükemmel bir ortam sağlamanın yanı sıra agaroz jelleri, DNA parçalarının saflaştırılmasını sağlamaktadır. Bir agaroz jel içinde ayrılmış DNA boyutunun ayrıştırılması, kopyalama gibi bir dizi moleküler teknik için gerekli olduğundan, ilgilenilen parçaların jelden saflaştırılabilmesi önemlidir. Ayrıca, agaroz jel elektroferezi kullanılarak nükleik asit ayrılması, ilgilenilen bir bandın daha

fazla saflaştırılması için bir başlangıç basamağı olabilmektedir. Tekniğin uzatılması, istenen bandın UV transillüminatörü ile görüntülenene boyalı bir jelden çıkarılmasını içermektedir [1].

Agaroz jel elektroforezi, proteinleri, DNA veya RNA'yı ayırmak için rutin olarak kullanılan bir yöntemdir [2]. Nükleik asit molekülleri, negatif yüklü moleküllerin anot (pozitif) kutbuna doğru göç ettiği bir elektrik alanın yardımı ile ayrılmaktadır. Geçiş akışı yalnızca küçük ağırlıklı moleküllerin büyüklerden daha hızlı göç ettiği, molekül ağırlığı ile belirlenmektedir [3]. Bu elektroforez işlemi sürecinde oluşan yüksek miktardaki ısı ve akım jelin erimesine yol açar, DNA bandları gülümseme etkisi (smile effect) oluşur, DNA bandlarının çözünürlüğü azalır ve jel bozulur. Bu nedenle, standart boyuttaki jeller için 5-8 V/cm ve 75 mA veya mini jeller için 100 mA değerlerinin aşılması özellikle önerilmektedir. Diğer yandan, gerilim çok düşük olduğunda küçük DNA (≤ 1 kb) hareketliliği azalır ve saçınım ile yayınım nedeniyle band genişlemesi oluşmaktadır [4].

Bu konuyla ilişkili yapılan bazı çalışmalar şu şekildedir:

Hoagland'ın çalışmasında poliakrilamid jeller için voltaj kontrolü, çıkış uçları arasındaki kontrol devresine yerleştirilen 100 ohm'luk eşit dirençlerle yapılmıştır. Kontrol devresine değişken dirençler (kesiciler) yerleştirilmiştir. Bu ünite, 2 dev / dk'da dönebilen bir tambur üzerinde 60 adıma ayarlanmış, tırnaklarla aktive edilen 20 adet hareketli mikro anahtardan oluşmaktadır. Voltaj adımları istenilen seviyelere ayarlanabilir ve zamanlar 12 dakikalık aralıklarla uzatılabilmekte veya kısaltılabilmektedir. Devre düzenlemesi ile sürekli geçerli çalışma elde edilebilmektedir. Sonuç olarak programlanan güç kaynağı, poliakrilamid jel elektroforezi için çok faydalı bir cihaz olduğunu kanıtlanmış ve rutin çalışmaların sıkı bir şekilde kontrol edilmesini sağlamıştır [5]. Başka bir çalışmada ise Kadokami ve arkadaşları konvansiyonel güç kaynağı yerine kullanılabilecek tek diyottan oluşan basit bir devre tasarlamıştır. Bu şekilde elde edilen elektroforetik kalıplarda kayda değer bir fark olmadığı, bu basit, ekonomik sistemin laboratuvar, endüstriyel, eğitimsel ve klinik tesislerde kullanılabileceği belirtilmiştir [6]. Benzer bir çalışmada ise Walker ve Blair, plazmidlerin iyi çözünürlüğünü vermek ve endonükleaz DNA sindirimini kısıtlamak için kullanılabilecek çok basit ve ucuz ekipmanlardan oluşan bir devre geliştirmiştir. Elektroforetik ayırmalar, düşük maliyetle kolayca temin edilebilen ve emniyetli voltajlarda çalışan 12 volt şebeke adaptörleri tarafından sağlanan doğru akım kullanılarak elde edilmiştir [7].

Konu alanı ile ilgili yapılan çalışmalar incelenerek bu çalışma ile nükleik asit ve protein ayırma yöntemi olarak kullanılan elektroforez işlemi için iki farklı sayısal kontrol yöntemi geliştirilmiş ve bu kontroller Python programlama dili kullanılarak hazırlanan arayüz yazılımı ile sağlanmıştır. İlk olarak jel elektroforezi oluşturan güç kaynağı devresinin kontrolünde sayısal potansiyometre ve DAC (Dijital analog çevirici) kullanılarak gömülü sistem ile uyumlu çalışabilecek güncel bir tasarım gerçekleştirilmiştir. Bu tasarım UV transillüminatör ve jel görüntüleme seti ile bir bütün halinde işlem yapabilecek, kullanıcı ile etkileşimli bir arayüze sahip, elde edilen görüntülerin gömülü sistem tabanlı elektronik ortama aktarıldığı özelliklere de sahiptir. Ayrıca bu çalışmada donanımsal olarak birbirinden bağımsız şekilde kullanılan elektroforez güç kaynağı, elektroforez tankı, UV transillüminatör ve jel görüntüleme cihazlarının mini jel elektroforez uygulamaları için bütünleştirilmiş bir sistem halinde kullanımı sağlanmıştır. Ayrıca elektroforez işlemi sonucunda band görüntülerinde oluşan gülümseme etkisi, geliştirilen kontrol yöntemleri ile azaltılarak klasik sisteme göre daha düzgün ve ölçülebilir band görüntülerinin oluştuğu belirlenmiştir.

Çalışmada öncelikle elektroforez işlemi hakkında bilgi verilmiştir. Daha sonra jel elektroforez işleminde kullanılan güç kaynağı devresinin teorik alt yapısı ve çalışmada kullanılan mini jel elektroforez işlemi için yeni kontrol yöntemleri uygulanarak tasarlanmış güç kaynağı devreleri hakkında bilgi verilmiştir. Bir sonraki bölümde Python programlama dili ile oluşturulan kontrol arayüzünün işlevleri ve sistemin kontrol algoritma şeması açıklanmıştır. Son olarak oluşturulan sistem ile yapılan test ve uygulama deneylerinde ölçülen değerler ve alınan band görüntüleri analiz edilmiştir.

2. ELEKTROFOREZ (ELECTROPHORESIS)

2.1. Tanımı (Description)

Elektroforez; elektrolit çözeltisi içerisinde elektrik akımı geçtiğinde elektrot kutubuna zıt yönde çözülmüş ya da dağılmış, elektrik yükü ile yüklenen protein, kolloid, molekül ve diğer parçacıkların hareketi olarak belirtilen bir fiziksel analiz yöntemidir. Elektrik alan etkisi ile yüklenen moleküllerin hareketleri zıt yüklü elektrotlara doğrudur. Bu hareket elektroforetik hareketlilik olarak adlandırılır ve $m^2 / (\text{Volt} \times \text{saniye})$ birimi ile ifade edilen 1 metrede 1 voltluk elektrik alanın etkisi altında, yüklenmiş parçacıkların birim zamanda metre biriminde hareketi ve $(\text{Volt} \times \text{saniye})$ başına metrekare olarak birimi ile (Eşitlik.1) ifade edilmektedir. Pratik olarak $cm^2 / (\text{Volt} \times \text{saniye})$ birimi kullanılır [8].

Mobilite, verilen bir iyon ve ortam için karakteristik bir özelliktir ve bir elektrik alan tarafından verilen kuvvet ve onun ortam boyunca bir sürtünme kuvveti tarafından belirlenmesidir.

$$\mu_{ep} = \frac{q}{6\pi\eta} [9]. \quad 1$$

Wenz ve diğerlerinin tanımına göre jel elektroforez; boyutları ve yükleri esas alınarak makro molekülleri (DNA, RNA ve protein) ve onların parçalarını analiz ve ayırma yöntemidir. Nükleik asit moleküllerini hareket ettirmek ve ayırmak için bir elektrik alan agaroz ya da başka bir tampon üzerinden uygulanır. Kısa moleküllerin hareketi uzun moleküllerin hareketinden hızlı ve uzak mesafeye olacak şekildedir. Bunun nedeni kısa moleküllerin jel yapısındaki deliklerden kolaylıkla geçmesidir. Bu işlem eleme olarak tanımlanır [10-12].

2.2. Jel Elektroforez Çeşitleri (Types of Gel Electrophoresis)

En sık kullanılan Jel Elektroforez çeşitleri [8];

1. Poliakrilamid Jel Elektroforez (PAGE)
2. Agaroz Jel Elektroforez (AGE)

2.2.1. Poliakrilamid Jel Elektroforez (Polyacrylamide Gel Electrophoresis)

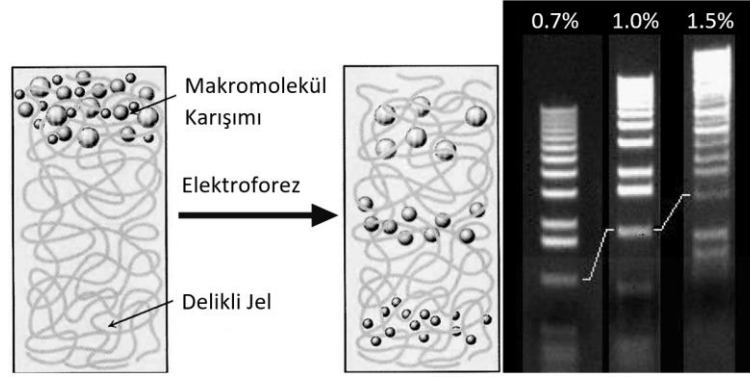
Hem proteinlerin hem de nükleik asitlerin elektroforetik olarak ayrılması için uygun çok daha güçlü bir jel, akrilamidin polimerizasyonu ile oluşturulabilir. Bir metilen köprüsü (N,N': metilenbisakrilamid) ile bağlanan az miktarda bir akrilamid çaprazının dahil edilmesi, mekanik olarak güçlü ve kimyasal olarak inert olan yüksek kontrollü bir gözenekliliğe sahip çapraz bağlı bir jelin oluşmasına izin verir. Proteinlerin ayrılması için, akrilamid: N,N' metilen bisakrilamid oranı genellikle 40:1 iken DNA ayrımı için 19:1'dir. Bu tür jeller, geniş bir kütle aralığında DNA ve proteinlerin yüksek çözünürlüklü ayrımı için uygundur [13].

2.2.2. Agaroz Jel Elektroforez (Agarose Gel Electrophoresis)

Agaroz jelleri, 10 nm çapından büyük moleküllerin analizinde büyük gözenekler gerektiğinde kullanılır. Agaroz, kırmızı deniz yosundan elde edilen bir polisakkarittir. Agaroz jel elektroforez uygulamasında kullanılan malzemeler basittir ve içeriğinde; elektroforez tankı, güç kaynağı, jeli dökmek için tepsi, elektroforez tamponu, örnek yükleme tarakları, yükleme tamponu, boya ve transillüminatör bulunur. Jel hazırlamada, elektroforez tamponuna belirlenen yoğunlukta agaroz tozu karıştırılır ve eritmek için mikrodalga fırında ısıtılır. Elektroforez işlemi sonrasında DNA görüntüsünün kolay alınabilmesi için jele EtBr (Ethidium Bromide) (0,5µg/ml) eklenir. Çözelti yaklaşık olarak 60°C'ye kadar soğuduğunda örneklerin yüklenmesi için tarakların olduğu tepsiye dökülerek, oda sıcaklığında jel haline dönüşmesi için soğumaya bırakılır. Jel haline geldiğinde tarak, kuyucuklar bozulmadan dikkatli bir şekilde çıkarılır. Tepside bulunan jel tampon ile kaplanmak için yatay bir şekilde elektroforez tankına yerleştirilir. DNA ve tampon karışımına sahip örneklerin kuyucuklara yerleştirilmesi mikro pipet ile yapılarak kapak ve güç

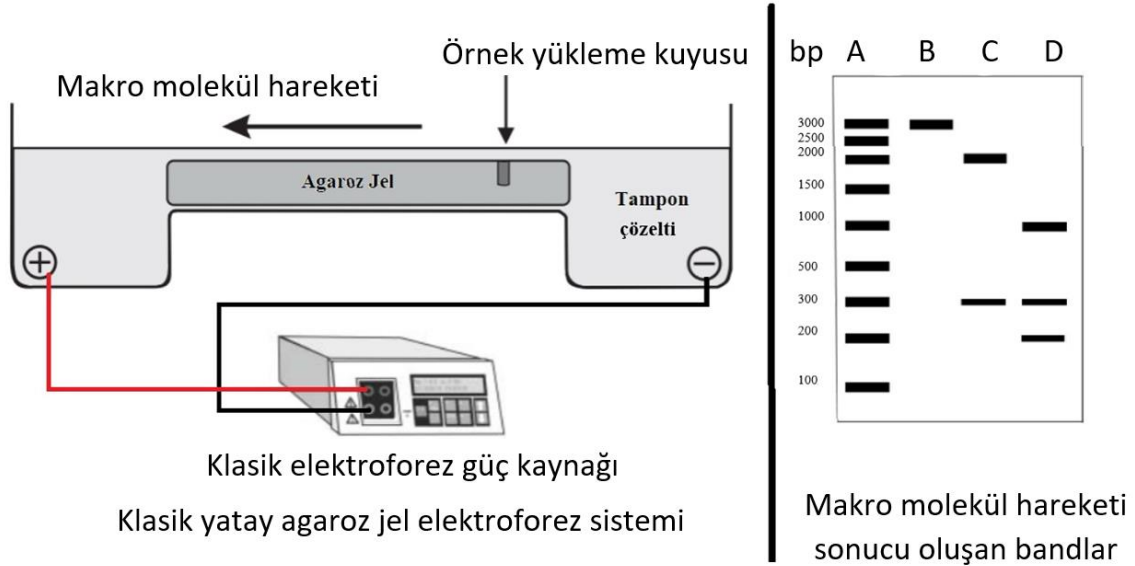
kablolari takıldıktan sonra güç kaynağından enerji uygulanır. Elektrot uçlarında baloncuk meydana gelmesi, akım hareketinin oluştuğunu belirtir [13].

Elektroforez işlemi sonrasında makro molekül karışımı yapısı delikli jel içerisinde ayrışır ve alt ya da üst kısmından UV ışığı verildiğinde band görüntüsünün oluşumu Şekil 1’de gösterilmektedir. Jeldeki DNA’nın hareketi Xylene-cyanol ve Bromophenol mavisi gibi boyaların hareketi sonucu oluşan izler ile belirlenir [13].



Şekil 1. Elektroforez işlemi sırasında jel üzerinde ayrılmış makro moleküller [13].

Klasik elektroforez sisteminde jel içindeki makro moleküllerin hareketi, güç kaynağının kutupları elektrolit çözeltisi ile jelin bulunduğu tankın uçlarına Şekil 2’deki gibi bağlanarak sağlanmaktadır.



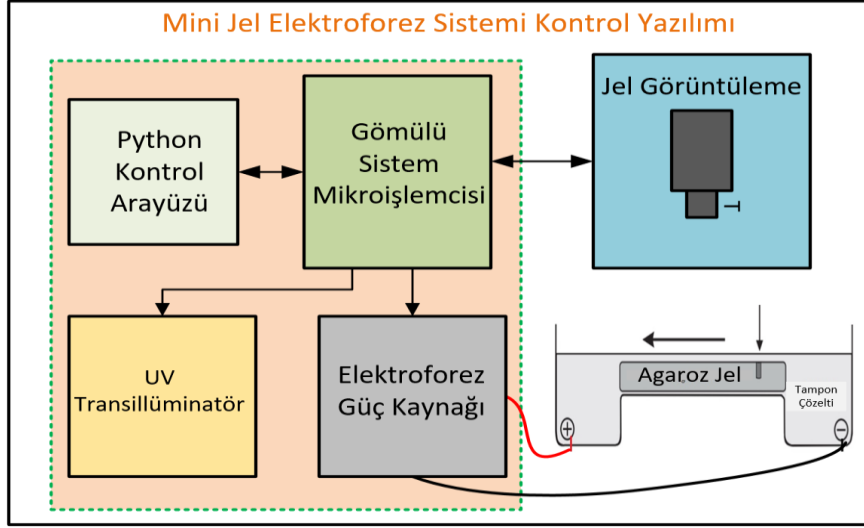
Şekil 2. Yatay agaroz jel elektroforez sisteminde makro moleküllerin göçü.

3. PYTHON İLE MİNİ JEL ELEKTROFOREZ KONTROL YAZILIMI (MINI GEL ELECTROPHORESIS CONTROL SOFTWARE WITH PYTHON)

Python programlama dili 1991 yılında Guido Van Rossum tarafından tanıtılması ile en yaygın kullanıma sahip, genel amaçlı, yüksek seviye programlama dillerinden biri haline gelmiştir. Python, açık kaynaklı bir programlama dili olarak birçok destekleyici kütüphaneyi içermektedir. Bu kütüphaneler Python'u en çok genişleyen ortamlardan biri yapan en iyi özelliğidir. Python, dinamik bir programlama dili olarak çalıştırılabilir kodları derleyip oluşturmak için bir derleyici kullanmak yerine kodun çalıştırılması sırasında bir tercüman kullanır. Python'un geliştirilme amacı, kavramların kolayca ifade edilmesi için esnek,

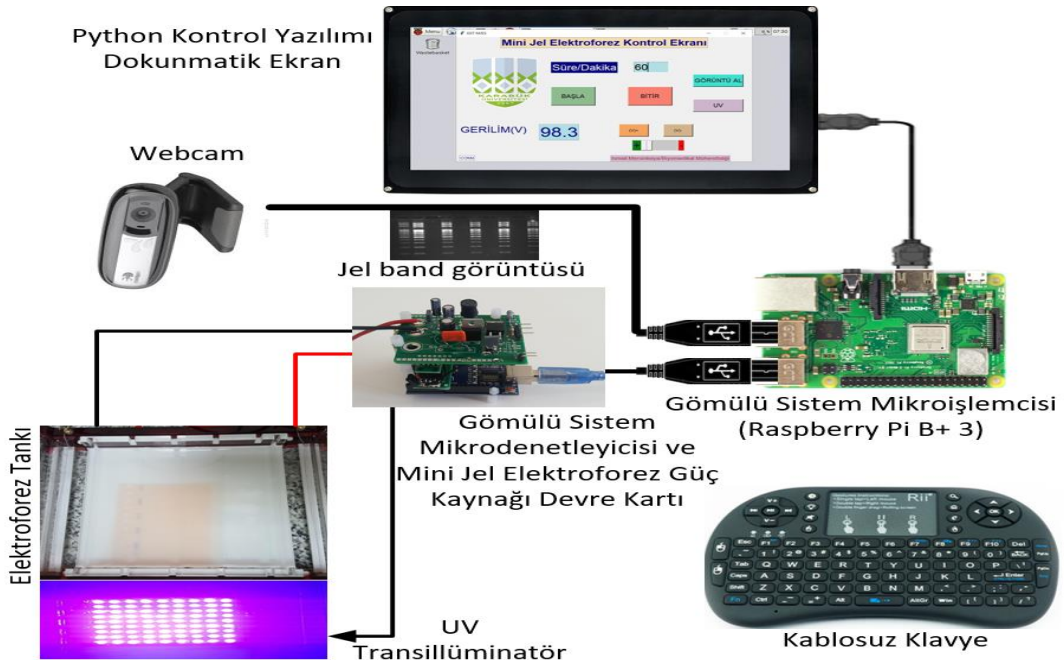
okunabilir ve açık kodlar oluşturmaktır. Python, otomatik bellek yönetimi sayesinde işlevsel, zorunlu ve nesne yönelimli programlamayı desteklemektedir [20].

Python ile oluşturulan kontrol yazılımı ve kontrol edilen mini jel elektroforez sistemi uygulamasına ait blok şema Şekil 3'te verilmektedir. Şekilde bloklar arasındaki iletişim tek yönlü ve karşılıklı olarak oklarla belirtilmektedir. Sistemin kontrolünde gömülü sistem mikrodenetleyici kartına (Arduino UNO) donanım yazılımı (firmware) yüklenerek USB bağlantısı üzerinden gömülü sistem mikroişlemci kartı (Raspberry Pi 3 B+) ile haberleşmesi sağlanmaktadır. Anlık veriler ve işlem sonrasında görüntüler kontrol arayüzünde gösterilmektedir.



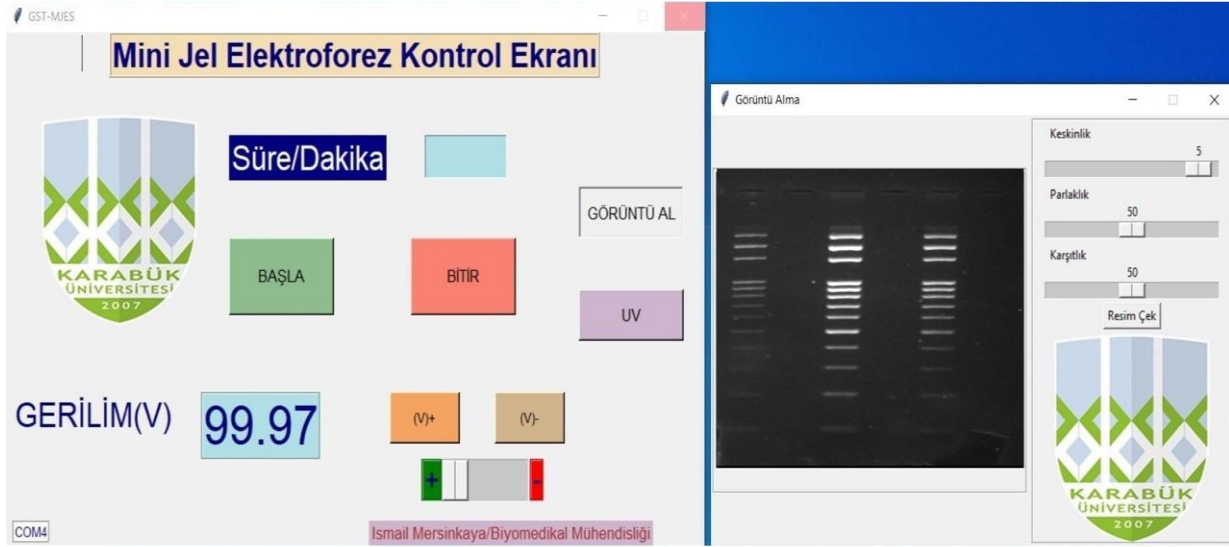
Şekil 3. Python ile mini jel elektroforez kontrol yazılımı ve sistem tasarımı blok şeması

Çalışmanın sistem akış şeması Şekil 4'te gösterilmektedir. Sistemin güç kaynağı devresi kontrolünü mikrodenetleyici kart ile sağlayabilmek için devre kartı ayrılabilir bir birim olarak tasarlanmış ve mikrodenetleyici kart soketlerine yerleştirilmiştir.



Şekil 4. Python ile oluşturulan kontrol yazılımı ve kontrol edilen mini jel elektroforez sistemi uygulama blok şeması.

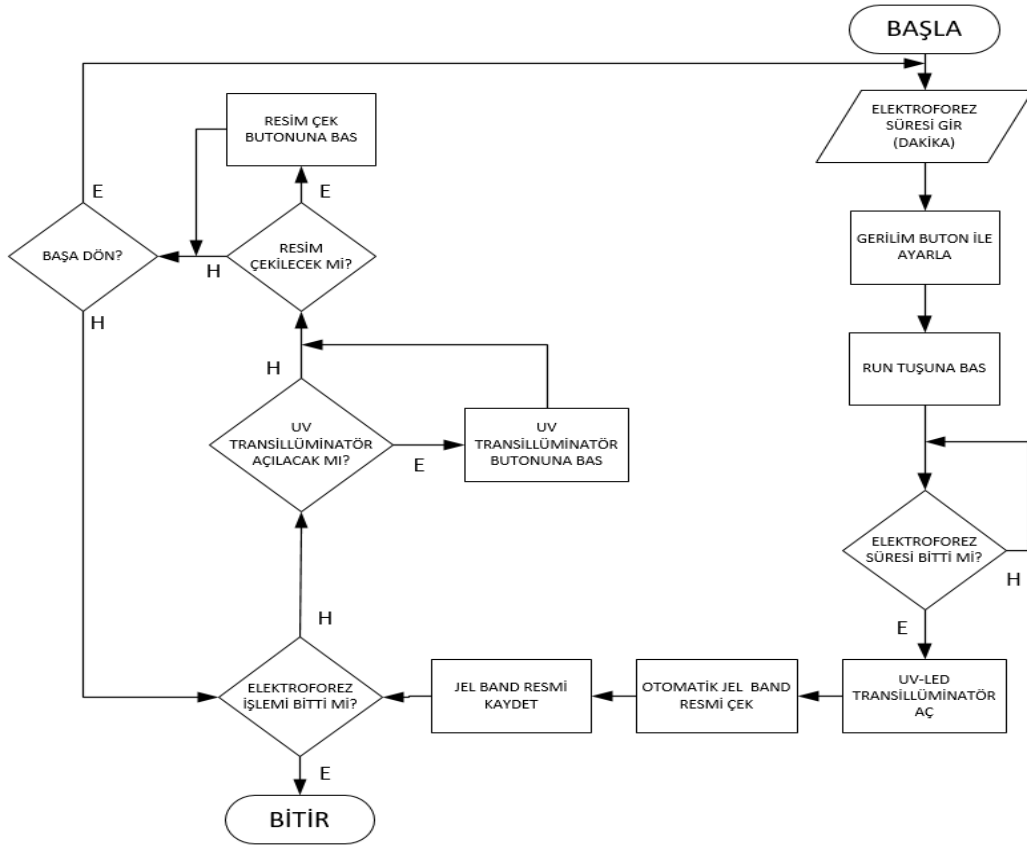
Şekil 5’te gösterilen arayüz yazılımı, gömülü sistem işlemcili geliştirme kartı (Raspberry Pi) üzerinde yüklü Raspbian-Linux işletim sisteminde, Python 3.5 programlama dili kullanılarak oluşturulmuştur. Kullanıcı arayüzü ile elektroforez işlemi için gerekli gerilim değerleri, elektroforez süresi, süre sonunda band görüntüsü almak için UV transillüminatör ve kamera ile band resmi alma işlemleri kontrol edilmiştir [14].



Şekil 5. Python ile mini jel elektroforez kontrol arayüz yazılımı.

Sistem kontrol arayüzü tasarımında Python programlama dilinde sık kullanılan Tkinter kütüphanesi özelliklerinden faydalanılmıştır. Bu sayede Şekil 5’te gösterilen arayüz üzerinde istenilen kontrol nesnelere istenilen düzende yerleştirilebilmektedir. Özellikle gerilim değerinin arayüz ekranında görülebilmesi, kullanıcı açısından kolaylık sağlamaktadır.

Kontrol yazılımının akış şeması Şekil 6’da gösterilmiş, işlem ve karar adımları açık bir şekilde belirtilmiştir. Elektroforez işlemi için hazırlanan jel yatay elektroforez tankına yerleştirilerek tankın uçlarındaki (+) ve (-) kutuplara sistem güç kaynağının kırmızı ve siyah çıkış soketlerine takılı enerji kabloları bağlanır. Sistemin çalıştırılması ile ekrana gelen arayüz üzerinde, uygulanacak elektroforezin süresi dakika olarak girilir. İstenilen gerilim değeri yazılımda oluşturulan buton nesnesi ve kaydırma çubukları yardımıyla ayarlanarak “BAŞLAT” butonu ile elektroforez işlemi başlatılmış olur. Elektroforez süresi bitiminde sistem, yazılımda tanımlanan fonksiyona bağlı olarak 2 saniye aralıklar ile önce güç kaynağını kapatır sonra UV transillüminatörü açar ve jel üzerinde görüntülenen bandların resmini otomatik olarak çekerek kaydeder. Bu işlem sırası bittiğinde istenirse UV transillüminatör “UV” butonu ile tekrar açılabilir ve “GÖRÜNTÜ AL” butonu ile (Şekil 5’teki gibi) band resmi almayı sağlayan alt program çalıştırılarak istenilen band resmi kaydedilebilir. Pencere kapama ekranına basılmadığı sürece arayüz güç kaynağının bağlı olduğu gömülü sistem, mikrodenetleyici kartı ile USB bağlantısı üzerinden sürekli iletişim halindedir ve ekran üzerinde gerilim değeri anlık olarak görülebilmektedir.



Şekil 6. Kontrol yazılımının akış şeması

Çalışmada jel elektroforez işlemi için güç kaynağı olarak arttıran tip DA-DA çevirici devresi kullanılmıştır. Anahtar kapandığında ilk durumda diyot ters polarmalı olduğundan çıkış yalıtılmış durumdadır. Girişten uygulanan gerilim ile bobin enerjilenir. Anahtar açıldığında girişten ve bobinden alınan çıkış enerjisi, giriş enerjisini de arttırmaktadır. Burada belirtilen kalıcı durum analizidir. Çıkış filtre kondansatörü oldukça büyük kabul edilerek sabit çıkış gerilimi sağlanmaktadır ($V(t) \cong V_o$). Şekil 7’de arttıran tip güç kaynağı devresi gösterilmektedir. Bir zaman periyodundan fazla indüktör gerilimine ait zamanın integrali kalıcı durum süresince sıfırdır;

$$TS = t_{on} + t_{off} \text{ ve } D = \frac{t_{on}}{TS} \quad [16] \quad 2$$

olarak verildiğinde;

$$V_d \times t_{on} + (V_d - V_o) \times t_{off} = 0 \quad [16] \quad 3$$

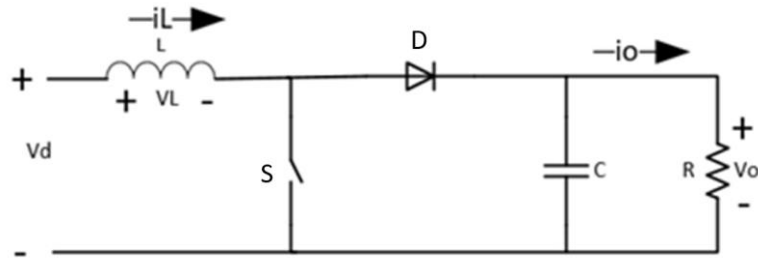
Her iki taraf T_s 'e bölüldüğünde;

$$\frac{V_o}{V_d} = \frac{T_s}{T_{off}} = \frac{1}{(1-D)} \quad [16] \quad 4$$

Kayıpsız bir devre için;

$$P_d = P_o, V_d \times I_d = V_o \times I_o \text{ ve } \frac{I_o}{I_d} = (1 - D) \quad 5$$

olmalıdır [16].



Şekil 7. Arttıran tip DA-DA çevirici [16].

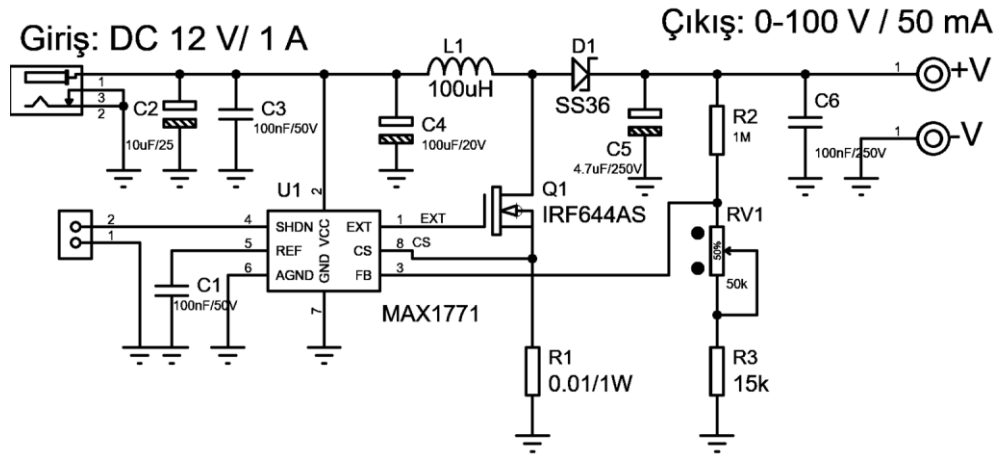
DA-DA çevirici devresinin çalışmasında S anahtarlama elemanının yüksek seviyede (Bu çalışma için KHz seviyesi) tetikleme sinyaline uygun olması gerekmektedir. Bobin üzerinden depolanan enerjinin çıkış kondansatörünü DA gerilim ile doldurabilmesi, yüksek anahtarlama hızı ve D diyotu için de yüksek gerilim ve akım değerlerini hızlı anahtarlama sürelerinde (Bu çalışma için nanosaniye) çıkışa iletebilmesi ile mümkündür.

Bu çalışmada kullanılan güç kaynağı devresinin çıkış gerilimi;

$$V_{out} = V_{ref} \times \left(\frac{R_2}{(R_3 + R_{V1})} + 1 \right) \quad [17] \quad 6$$

formülü ile hesaplanmaktadır. Bu formüldeki V_{ref} gerilim değeri, mikrodenetleyici üzerinde bulunan ADC (Analog sayısal dönüştürücü) giriş birimi ile mikroişlemciye gönderilerek sistem kontrol yazılımı ile hesaplanan değerlerin arayüz formunda görüntülenmesi sağlanmıştır. Analog veri dönüşümleri kontrolör içerisinde bulunan alt mimariler ile sayısal verilere dönüştürülerek algılanmaktadır [18].

Çalışmada Python ile oluşturulan kontrol yazılımı ile elektroforez güç kaynağında sabit çıkış gerilimi oluşturulmuştur. Bunun için mini jel elektroforez güç kaynağı olarak kullanılan Şekil 8’de verilen Nixie güç kaynağı [17] test devresi uygulamasında kullanılan IRF644 mosfeti ve SS36 diyotu yerine, 35 ns anahtarlama süresi ve 600 V gerilim değerlerine sahip DSEI12-06A diyotu ve IRF740 mosfeti kullanılarak kontrol yazılımı ile test uygulaması yapılmıştır.

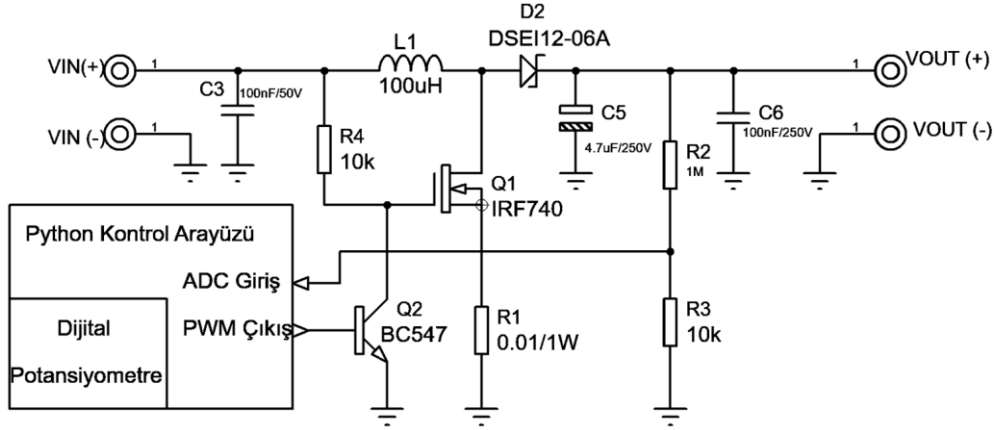


Şekil 8. Nixie güç kaynağı [17].

Yöntemlerden ilki güç devresinin kontrolü için Şekil 9’da belirtilen devreye 10KΩ değerindeki X9C103S dijital potansiyometresi eklenerek 31 kHz ve 62 kHz’lik PWM sinyal frekanslarının değiştirilmesi ile anahtarlama elemanı olarak kullanılan Q_1 IRF740 mosfeti Q_2 BC547 transistörü ve direnç devresi üzerinden sürülerek çıkış gerilimin arttırılıp azaltılmasının sağlanmasıdır. D1 diyotu olarak da 35 nsn

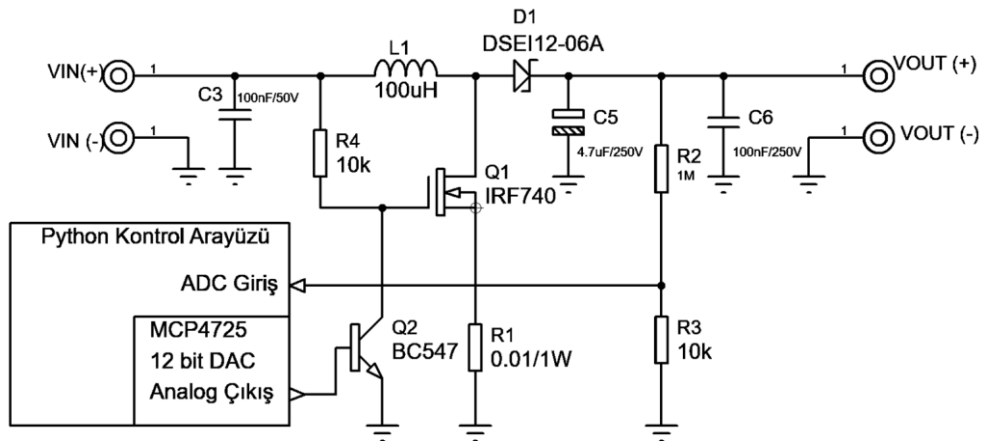
tetikleme süresi ve 2 A ile 600 V değerleri iletebilen DSEI12-06A diyotu kullanılmıştır. Dijital potansiyometre 100 adımda 0 Volt ile 100 Volt değeri arasında ayarlama yapmayı sağlamaktadır.

Gerilim bölücü dirençlerden gelen geribesleme gerilimi, sistemin ADC girişinden algılanarak devre çıkış geriliminin hesaplanıp arayüz üzerinden gösterilmesi için oluşturulan yazılım algoritmasına gönderilmektedir. Yazılım algoritması ADC girişine gelen analog değeri sayısal değere dönüştürerek hesaplanmasını sağlar. Gömülü sistem mikrodenetleyicisinin (Arduino UNO) ADC girişi 10 bit (100 μ s okuma hızı) çözünürlüğe sahiptir. Bu çözünürlük 5 Volt gerilimin 1024 birime bölünerek ($5 \text{ V} / 1024 = 4.9 \text{ mV}$) birim başına 4.9 mV'luk değer okunmasını sağlamaktadır. Her bir birimin okunma hızı da 100 μ s olarak belirtilmiştir [15].



Şekil 9. Dijital potansiyometre kontrollü güç kaynağı devre şeması.

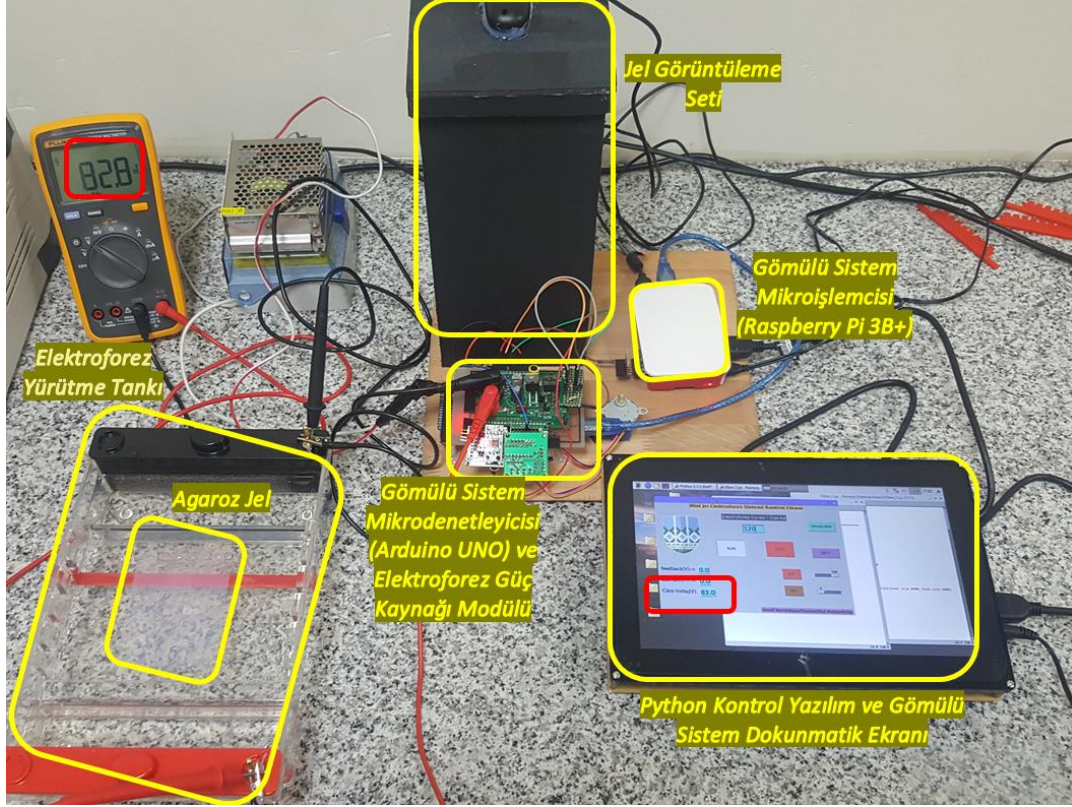
Yöntemlerden ikincisi, Şekil 10'daki devrede MCP4725 DAC (Sayısal Analog Dönüştürücü) entegresi kullanılarak transistör tetikleme gerilimi değiştirilmiş ve IRF740 mosfetinin anahtarlama işlemi yapılarak çıkış geriliminde değişim sağlamaktadır. Kullanılan DAC entegresi 12 bit çözünürlükte 0 ile 5 volt gerilim değerleri arasında analog çıkış kontrolünü ve bu gerilim değerleri Şekil 10'da gösterilen devrede Q₂ transistörünün tetiklenmesini sağlamıştır. Tetikleme sonucunda anahtarlama elemanı Q₁ ile IRF740 mosfeti sürülerek çıkış gerilimi artırılıp azaltılmıştır.



Şekil 10. DAC kontrollü güç kaynağı devre şeması.

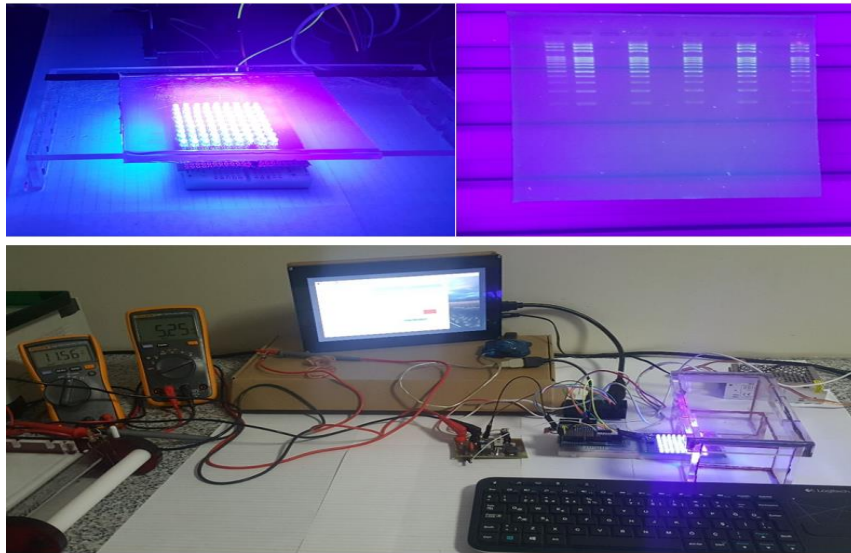
İkinci kontrol yönteminde, arayüz yazılımında oluşturulan işlev kaydırma çubuğu sınırları olarak 12 bit karşılığı 0 ile 4096 arasında 1 artırımlı olarak değişken değerinin 0-4096 arasında değişimini sağlamaktadır. Böylece DAC entegresinin değişken değerlerinin değişimi ile çıkış geriliminde 0-5 volt aralığında sabit DC gerilim ile mosfet anahtarlama elemanının kontrolü sağlanmaktadır. Böylelikle güç kaynağı çıkış gerilimi istenilen değerde sabitlenmektedir. DAC entegresinin değişken değeri "0" değerini aldığı anda çıkış gerilimi

uygulama üzerinde giriş ile aynı değere inerek elektroforez işleminin sonlanmasını sağlamaktadır. Böylelikle Python arayüz yazılımında oluşturulan kontrol algoritması ile değişik sürelerde sistemin çalıştırılması sağlanmakta ve Şekil 11’de gösterilen elektroforez işlemi, oluşturulan yazılım ile kontrol edilebilmektedir.



Şekil 11. Python ile mini jel elektroforez kontrol yazılımı ve sistem tasarımı

Elektroforez süresi sonunda makro moleküllerin ayrıştığını belirten bandların görüntülenmesi, Şekil 12’de verilen karanlık bir kutu içerisinde çalıştırılan 320 nm dalga boyundaki UV transillüminatörün UV ışığının jele alt kısımdan uygulanması sonucunda kamera yardımıyla sağlanmaktadır.



Şekil 12. Elektroforez işleminden sonra Python kontrol yazılımı ile jel görüntüleme setine ait UV transillüminatörün band görüntüleme için çalıştırılması.

UV transillüminatör devresi sistemin resim çekme işleminden önce devreye girerek jel görüntüsünün en uygun band görüntü resmini almayı sağlamıştır. Devre mat siyah fotoblok malzemeden yapılmış görüntüleme kutusunun içinde alt kısma, üzerinde amber filtre ile yerleştirilmiştir. Görüntünün alınmasını sağlayan kamera transillüminatörün tam karşısına gelecek şekilde 30 cm üstüne yerleştirilmiştir.

Band görüntüleme için deneysel uygulamalarda kullanılan iki farklı boyanın özellikleri Tablo 1’de belirtilmektedir. Verilenlere göre SYBR Green mutajen etkiye sahip olmadığı için deneysel çalışmalarda tercih edilmektedir. Böylece çalışma ortamlarının daha sağlıklı olması sağlanmaktadır. Çalışmada yapılan deneylerde, ortam güvenliği ve boyama kolaylığı sağlaması nedeni ile SYBR Green boyası kullanılmıştır.

Tablo 1. Band görüntüleme için kullanılan görüntüleme boyaalarının karşılaştırılması [19].

SYBR® Green	Ethidium Bromide (EtBr)
<p><i>GelStar ve SYBR Yeşil Nükleik Asit Jeli Boyaları, agaroz jellerinde nükleik asitleri tespit etmek için oldukça hassas ışık yayan boyaalarıdır. Etidyum bromürün aksine, bu boyaalar sadece nükleik asitlere bağlandığında ışık yayar. Arka plan boyaması minimumdur ve jellerin kirlenmesine gerek yoktur.</i></p> <p><i>GelStar Stain, çift sarmallı veya tek sarmallı DNA ve RNA için yüksek saptama hassasiyeti sağlar.</i></p> <p><i>SYBR Green I Stain, çift zincirli nükleik asitler için tercihlili benzeşim gösterir ve SYBR Green II Stain tek zincirli nükleik asitler için en hassastır.</i></p> <p><i>-Boyama çözeltisinden jel çıkarılır ve 300 nm UV transillüminatörle görüntülenir.</i></p>	<p><i>Ethidium bromide, hem tek hem çift sarmallı DNA tespit eden floresan bir boyadır. Bununla birlikte, tek zincirli DNA için benzeşim, çift zincirli DNA'ya kıyasla nispeten düşüktür.</i></p> <p><i>Ethidium bromide, DNA bazları arasında araya giren ve DNA'ya bağlandığında floresans veriminde bir artışa neden olan düzlemsel bir grup içerir.</i></p> <p><i>Ethidium bromide boyalı DNA, ultraviyole radyasyonla tespit edilir. 254 nm'de UV ışığı DNA tarafından emilir ve boyaya iletilir; 302 nm ve 366 nm'de UV ışığı, bağlı boyanın kendisi tarafından emilir. Her iki durumda da, görünür spektrumun kırmızı-turuncu bölgesinde 590 nm'de enerji yeniden yayılır.</i></p>
<p>Avantajları</p> <p><i>- Yüksek hassasiyet –etidyum bromürden 25-100 kat daha hassas.</i></p> <p><i>Esnek – GelStar Stain'i doğrudan agaroz çözeltisine ekleyin veya jelinizi GelStar veya SYBR Green Stains ile boyayın.</i></p> <p><i>Hızlı – İstenmeyen</i></p>	<p>Dezavantajları</p> <p><i>Mutajen – Kalıtsal genetik hasarlara neden olabilir</i></p>

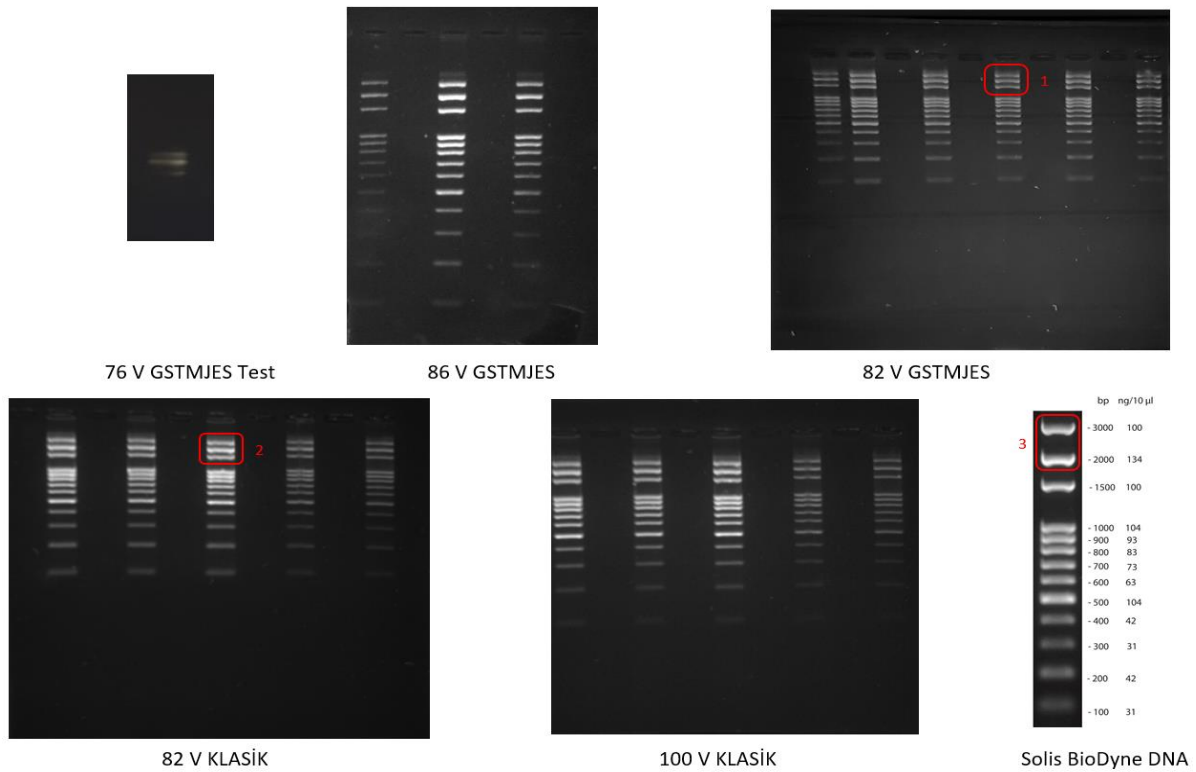
4. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Bu çalışmada geliştirilen kontrol arayüz yazılımı ve güç kaynağı kontrol yöntemleri ile farklı süre ve gerilimlerde deneyler yapılmıştır. Deneylerin sayısı ve uygulama çeşitliliği artırılmış, geliştirilen kontrol yazılımı ile kontrol yöntemleri, elektroforez işleminin yapıldığı sistem ve işlemde kullanılan değişken değerleri Tablo 2’de belirtilmektedir. Tabloda belirtilen elektroforez sistemi değişkenleri KLASİK ve MJES (Mini jel elektroforez sistemi) şeklinde verilmiştir. MJES değişkeni bu çalışmada geliştirilen kontrol yazılımının kullanıldığı ve geliştirilen sayısal kontrol yöntemlerini içeren sistem olarak belirtilmektedir.

Tablo 2. Uygulaması yapılan elektroforez işlemlerinin karşılaştırılması.

Uygulama Sıralaması	Elektroforez İşlemi için Kullanılan Değişken Değerleri				Kontrol Yöntemi	Elektroforez Sistemi
	Gerilim (V)	Akım (mA)	Süre (Dakika)	DNA Boyası		
1	76	63	30	EtBr	2	MJES
2	82	43	90	SYBR	2	MJES
3	82	43	90	SYBR	-	KLASİK
4	86	44	120	SYBR	1	MJES
5	100	34	120	SYBR	-	KLASİK

Tablo.2’de verilen değerlerin sonucunda oluşan band görüntüleri Şekil 13’te gösterilmiştir. Band görüntüleri incelendiğinde, giriş bölümünde tanımlanan gülümseme eğrisi ve yayılım etkilerinin, SYBR Green ürün veri sayfasında verilen görüntülerdeki eğri ve yayılım etkilerinden daha az olduğu görülmektedir. Bu sonuca tabloda verilen 82 V gerilimde yapılan 2 ve 3 nolu elektroforez işlemlerinden elde edilen band görüntülerinin karşılaştırılması ile varılmaktadır. Her iki görüntüden alınan 443x115 piksel boyutunda birer band görüntüsü, istatistiksel analiz yöntemlerinden biri olan ortalama mutlak sapma (MAD) işlemine tabi tutulmuştur. Ortalama mutlak sapma alternatif bir dağılım özetidir. Bu sadece her bir puan ile toplam ortalama arasındaki mutlak farkların ortalamasıdır. Ortalama olarak, herhangi bir rakamın genel ortalamadan farklı olduğu miktardır. Ortalama mutlak sapma, sonuçta her sapmaya orantılı yerini verir [21]. Böylece aynı bandların iki farklı sistemde piksel olarak ortalama mutlak sapmalarının oranı hesaplanmıştır. Bu hesaplama ile bandların yatay olarak düz bir doğruya ne kadar yakın oldukları (0 a yakın) bulunarak sistemin bandlar üzerindeki işlevselliği belirtilmiştir. Ortalama mutlak sapma değeri “0” a yakın olan bandlar daha düzgün yani gülümseme eğrisi daha düşük olarak ifade edilebilir.

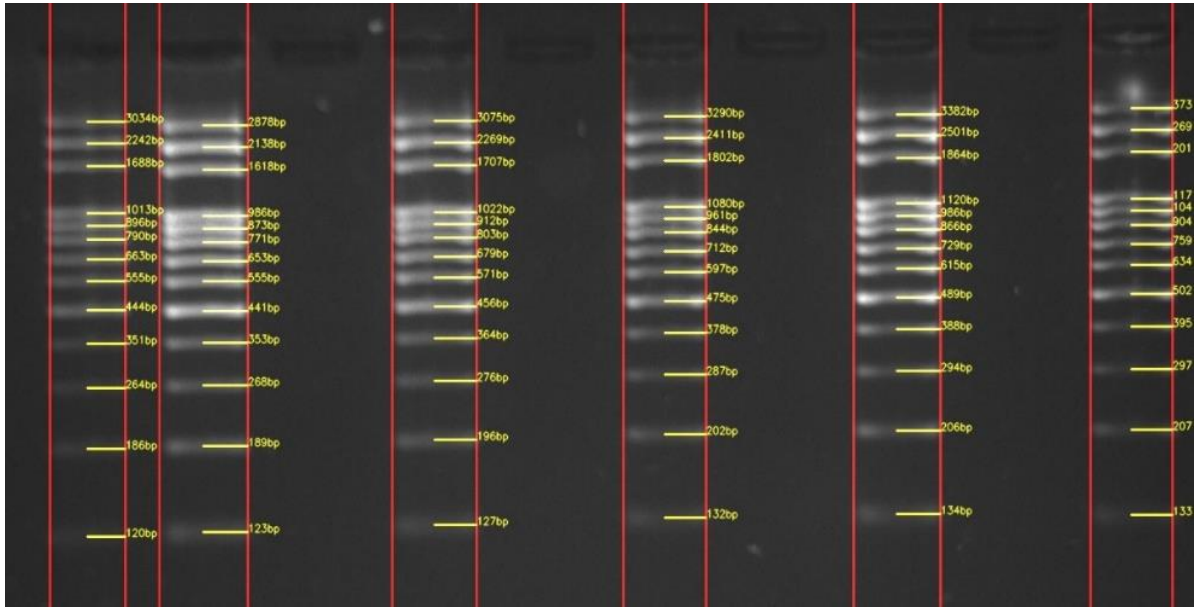
**Şekil 13.** Mini jel elektroforez kontrol yazılımı kullanılarak yapılan elektroforez işlemi band görüntüleri ile klasik elektroforez işlemi band görüntüleri.

Band görüntülerinin ortalama mutlak sapma hesabı için öncelikle tasarlanan sistem ile yapılan uygulama sonucunda oluşan görüntüden Şekil 13'deki 1 ve 2 nolu çerçevelerdeki bandlar seçilmiştir. 1 nolu çerçevede ilk bandın ortalama mutlak sapması 6.15 olarak hesaplanmıştır. İkinci seçilen bandın ortalama mutlak sapması 5.13 ve üçüncü seçilen bandın ortalama mutlak sapması 5.21 olarak hesaplanmıştır. Daha sonra klasik elektroforez işlemi sonucunda oluşan görüntülerden 2 nolu çerçevedeki bandların ortalama mutlak sapmaları sırasıyla 6.52, 5.50 ve 7.25 tir. Bulunan sonuçların "0" a yakınlıkları sırasıyla karşılaştırıldığında;

- $0 < 6.15 < 6.52$ olduğundan 6.15 değerli band değerine göre daha düzgündür;
- $0 < 5.13 < 5.50$ olduğundan 5.13 değerli band değerine göre daha düzgündür;
- $0 < 5.21 < 7.25$ olduğundan 5.21 değerli band değerine göre daha düzgündür;

şeklinde yorumlanabilir. Bu yorumlar sonucunda düşük değerli band görüntülerinin tasarlanan arayüz yazılımı ile kontrol edilen sistemin sonuçları olduğu ve sistemin klasik sisteme göre daha düzgün band görüntüleri oluşturduğu belirlenmiştir. Band görüntülerinin gömülü sistemde oluşturulan görüntü işleme yazılımı [22] ile bütünleştirildiğinde düzgün ve ölçülebilir bir şekilde ayrıldığı Şekil 14'te gösterilmektedir.

Python ile oluşturulan kontrol yazılımı ve bu yazılım ile kontrol edilen güç kaynağı devresi, giriş bölümünde belirtilen etkilerin oluşmasına neden olan gerilim ve zamana bağlı değerlerin işlem süresince sabit tutulmasını sağlamıştır. Böylece bandlarda gülümseme eğrisi, yayılım, kullanıcı kontrol ve band belirleme hataları gibi istenmeyen etkilerin oluşması engellenmiştir. Ayrıca SYBR Green boya kullanılarak daha güvenli bir uygulama yapılması sağlanmıştır. Gerilim değerinin yazılım ile hesaplanarak kontrol ekranında gösterilmesi ile kullanıcıya denetleme kolaylığı ve harici ölçme aletleri kullanımı sonucu oluşabilecek okuma hatalarının en aza indirilmesi; elektroforez işleminin zamanlama olarak istenilen sürede otomatik kontrollü yapılabilmesi sağlanmıştır.



Şekil 14. Jel görüntüsündeki bandların ve baz çifti sayılarının gömülü sistem görüntü işleme yazılımı ile elde edilmesi [19].

5. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışma ile jel elektroforez işleminde güncel teknolojilerin uyumu sağlanarak arayüz yazılımı ve otomatik çalışma özellikleri ile yeni bir kontrol sistemi geliştirilmiştir. Sistem ile kontrol edilen mini jel elektroforez güç kaynağı, günümüzde birçok gömülü sistem denetleyici ile uyumlu bir donanım yapısında oluşturularak kullanım kolaylığı sağlamış; klasik jel elektroforez sisteminden farklı olarak bütünleşik bir sistem şeklinde tasarlanmış ve uygulanmıştır. Oluşturulan mini jeldeki band görüntüleri UV ışığı

uygulanması ile elde edilmiş ve işlem sonunda elektronik ortama aktarımı sağlanmıştır. Ayrıca günümüzde çoğu biyomedikal cihazın ithal olarak temin edildiği göz önüne alındığında mini jel elektroforez uygulamaları için yerli ve düşük maliyetli bir sistem geliştirildiği yapılan araştırmalar ve deneysel uygulamalar ile belirtilmiştir.

Bu çalışma ile Python programlama dili kullanılarak oluşturulan mini jel elektroforez kontrol yazılımının elektroforez işlemi üzerinde sağladığı kolaylıklar ve geliştirilen kontrol yöntemlerinin elektroforez işlemi sonrasında jel üzerinde oluşan bandlarda gülümseme ve yayılma gibi istenmeyen sonuçların oluşmasını azalttığı görülmüştür. Gerilim kontrolü ve görüntülerin otomatik bir şekilde elektronik ortama alınabilme özellikleri ile kontrol yazılımının ve sistemin uygulanabilir olduğu belirtilmiştir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENTS)

Bu çalışmanın gerçekleşmesinde bilgi ve tecrübesi ile yardımlarını esirgemeyen sayın Dr. Öğr. Üyesi Ahmet Reşit KAVSAOĞLU ve sayın Dr. Öğr. Üyesi Muhammed Kamil TURAN hocalarım ile deneylerin yapıldığı Karabük Üniversitesi Eğitim ve Araştırma Hastanesi Mikrobiyoloji ve Genetik Laboratuvarı personeline teşekkürlerimi sunarım.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Sharp, P.A., Sugden, B., Sambrook J., Detection of two restriction endonuclease activities in *Haemophilus parainfluenzae* using analytical agarose-ethidium bromide electrophoresis, *Biochemistry*, 12, (1973), 3055-3063
- [2] Kryndushkin, DS., Alexandrov, IM., Ter-Avanesyan MD., Kushnirov, VV., Yeast [PSI+] prion aggregates are formed by small Sup35 polymers fragmented by Hsp10, *Journal of Biological Chemistry*, 278, 2003.
- [3] Sambrook, J., Russel DW., *Molecular Cloning: A Laboratory Manual*, Cold Spring Harbor Laboratory Press 3rd Ed., Cold Spring Harbor, 2001.
- [4] Barril, P., Nates, S., "Introduction to agarose and polyacrylamide gel electrophoresis matrices with respect to their detection sensitivities", *Gel Electrophoresis-Principles and Basics*, InTech, (2012).
- [5] Hoagland, P. D., Programmable power supply for polyacrylamide gel electrophoresis, *Analytical biochemistry*, 26(1), 194-197, 1968.
- [6] Kadokami, Y., Takao, K., & Saigo, K., An economic "power supply" using a diode for agarose and polyacrylamide gel electrophoresis. *Analytical biochemistry*, 137(1), 156-160, 1984.
- [7] Walker, J. H., & Blair, G. E. (1989). Agarose gel electrophoresis of DNA using aluminium electrodes and a 12 volt mains adaptor as power supply unit. *Biochemical Education*, 17(3), 150-151
- [8] Dipa, S., Surati, J., Review On: Electrophoresis: Method For Protein Separation, *Pharma Science Monitor* 7(2), 192-203, 2016.
- [9] Gürsoy, E., Kapiler Elektroforez Ve Potansiyometrik Belirleme, Yüksek Lisans Tezi, Samsun 19 Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun, 3-6, 2007.
- [10] Wenz, H. M., Robertson, J. M., Menchen, S., Oaks, F., Demorest, D. M., Scheibler, D., & Efcavitch, J. W., High-precision genotyping by denaturing capillary electrophoresis, *Genome Research*, 8(1), 69-80, 1998.
- [11] Barril, P., Nates, S., Introduction to agarose and polyacrylamide gel electrophoresis matrices with respect to their detection sensitivities, *Gel Electrophoresis-Principles and Basics*, InTech, 2012.

- [12] Maurye, P., Basu, A., Biswas, J. K., Bandyopadhyay, T. K., Electrophoresis-staining apparatus for DNA agarose gels with solution exchange and image acquisition, *Instrumentation Science & Technology*, 45(1), 49-61, 2017.
- [13] Reddy, R. P., Raju, N., Ed: Magdeldin, S., *Gel Electrophoresis-Principles and Basics*, Croatia: Intech Corp, 18-19, 2012.
- [14] Mersinkaya, İ., Kavsaoglu, A. R., Mini Gel Electrophoresis system based on embedded system, 26th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), İzmir, 1-4, IEEE, 2018.
- [15] İnternet: Arduino UNO, www.arduino.cc, 2019.
- [16] Mohan, N., Undeland, T. M., & William, P. Robbins, *Power Electronics–Converters. Applications, and Design* (3rd Edition), John Wiley & Sons Ltd, 2003.
- [17] İnternet: Smith, N., Nixie HV Switching PSU, <http://www.desmith.net/NMdS/Electronics/NixiePSU.html> , 2017.
- [18] Güler, N , Irmak, E . (2016), Mikrodenetleyici temelli sistemlerde dspic kullanımını ve örnek uygulama geliştirme süreci, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji* , 4 (2) , 71-82.
- [19] Cambrex, (2007). “The Source Book: A Handbook for Gel Electrophoresis”, Cambrex Corp, Rockland, 42-49
- [20] Desai, P., (2015), *Python programming for Arduino*, Packt Publishing Ltd, 2.
- [21] Gorard, S., (2015), Introducing the mean absolute deviation ‘effect’ size, *International Journal of Research & Method in Education*, 38(2), 105-114.
- [22] Özkara, K., Kavsaoglu, A. R., (2019), Image processing on electrophoresis image with embedded system, *International Conference on Advanced Technologies, Computer Engineering and Science (ICATCES 2019)*, Alanya, pp. 61-62

The Voltammetric Determination of Epinephrine on an Au Electrode Modified with Electropolymerized 3,5-Diamino-1,2,4-Triazole Film

Tuğba TABANLIGİL CALAM 

Gazi University, Technical Sciences Vocational High School, Department of Chemical Technology, ORCID: 0000-0002-3712-7713, 06374, Ankara, Turkey

Graphical/Tabular Abstract

Article Info:

Research article

Received: 24/09/2019

Revision 15/11/2019

Accepted: 19/11/2019

Highlights

- Simple and fast modification process.
- A good method for EP determination in real samples.

Keywords

Epinephrine
Coating
Electrochemical
behaviour
Voltammetric
determination
Drug

In this study, 3,5-diamino-1,2,4-triazole (35DT) was deposited on the gold electrode (Au) to fabricate a new sensor and used for the determination of epinephrine (EP). Comparing with the bare Au and modified electrode (35DT-Au), the 35DT-Au modified electrode has higher catalytic activities towards the oxidation of EP. Figure A shows that electrode modification process.

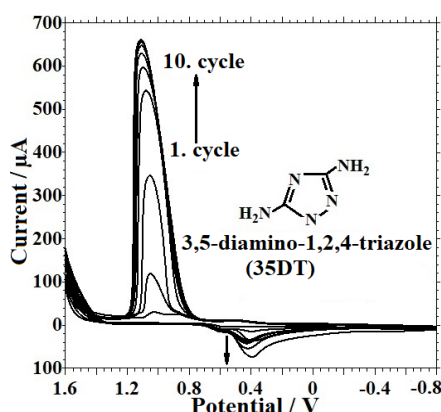


Figure A. CVs of 1mM 35DT on the bare Au electrode (10 cycle)

Purpose: The aim of this study to develop a new and applicable modified electrode in real samples such as drugs used for the determination of EP.

Theory and Methods: Epinephrine (EP) is found in biological body fluids. If strong emotions such as fear or anger are felt, EP is released into the bloodstream and causes an increase in heart rate, blood pressure and sugar. Many physiological events are associated with EP levels in body fluid. Therefore, determination of EP concentration in pharmaceutical samples and various biological fluids is important for pharmacological research. The electrochemical behavior of EP on the 35DT-Au surface was investigated using the DPV and CV techniques and optimum conditions was determined.

Results: The accuracy and precision studies for EP determination in the drug sample were expressed in values of RSD% and bias%, respectively. The bias% values for the determination of drug samples containing 5 µM and 15 µM EP were 0.4% and -4.07%, respectively; BSS% values were calculated as 0.4% and 2.72%, respectively.

Conclusion: In this study, a gold electrode modified with 3,5-diamino-1,2,4-triazole was used for EP determination. It is important to develop methods for the determination of EP, since the concentration of EP in the body fluid is lower or higher than the normal level, leading to various diseases. The modified electrode showed a wide linear working range compared to the modified electrodes prepared by alternative methods in the literature. Furthermore, the preparation of this sensor is simple and fast. The proposed sensor (35DT-Au) provided accuracy, selectivity, short measuring time, ease of preparation, good accuracy and good analytical performance. This modified electrode preparation process is a simple and fast process, does not require any pre-treatment, and shows satisfactory stability and reproducibility, provides a good alternative to current studies in the literature. In addition, the EP electrode was successfully applied with the modified electrode.



Elektropolimerize 3,5-Diamino-1,2,4-Triazol Film ile Modifiye Edilmiş Altın Elektrot Yüzeyinde Epinefrinin Voltametrik Tayini ve Elektrokimyasal Davranışı

Tuğba TABANLIGİL CALAM 

Gazi Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Kimya ve Kimyasal İşleme Teknolojileri Bölümü, ORCID: 0000-0002-3712-7713, 06374, Ankara, Türkiye

Öz

Bu çalışmada, altın elektrot (Au) yüzeyi 3,5-diamino-1,2,4-triazol (35DT) moleküllü ile elektrokimyasal yöntemle modifiye edilmiştir. Epinefrinin (EP) modifiye elektrot (35DT-Au) yüzeyindeki elektrokimyasal davranışı diferansiyel puls voltametri (DPV) ve dönüşümlü voltametri (CV) teknikleriyle incelenmiştir. EP'nin yükseltgenme işleminde 35DT-Au modifiye elektrot yüzeyi iyi bir elektrokatalitik aktivite göstermiştir. EP tayini, 35DT-Au modifiye elektrot yüzeyinde DPV tekniği kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Optimum şartlar altında, 35DT-Au modifiye elektrot ile EP'ye ait doğrusal çalışma aralığı 0,9-32,31 µM ve 32,31-1050 µM olmak üzere iki farklı derişim aralığı olarak belirlenmiştir. Bu iki derişim aralığı için gözlenebilir sınırları (LOD) sırasıyla 0,39 ve 12,33 µM olarak bulunmuştur. EP tayini için, 35DT-Au elektrot iyi bir tekrarlanabilirlik, kararlılık ve hassasiyet göstermiştir. Ayrıca, gerçek numune olarak ilaç numunei seçilmiş ve ilaçta EP tayini 35DT-Au elektrot ile başarıyla gerçekleştirilmiştir.

The Voltammetric Determination of Epinephrine on an Au Electrode Modified with Electropolymerized 3,5-Diamino-1,2,4-Triazole Film

Abstract

A gold electrode (Au) was modified with 3,5-diamino-1,2,4-triazole (35DT). The electrochemical behavior of epinephrine (EP) was evaluated on the modified electrode (35DT-Au) by the differential pulse voltammetry (DPV) and cyclic voltammetry (CV) techniques. For the oxidation of EP, the 35DT-Au modified electrode surface showed a good electrocatalytic activity. The modified electrode was used to determine EP by using DPV technique. Under the optimum conditions, the calibration curve for EP was obtained in the ranges of 0.9 to 32.31 µM and 32.31 to 1050 µM and the detection limits (LOD) was found as 0.39 and 12.33 µM, respectively. For the oxidation process of EP, the 35DT-Au modified electrode exhibited a good repeatability, reproducibility, stability and sensitivity. Finally, the determination of EP in commercial injectable adrenaline samples were successfully applied.

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 24/09/2019
Düzelme: 15/11/2019
Kabul: 19/11/2019

Anahtar Kelimeler

Epinefrin
Kaplama
Elektrokimyasal Davranış
Voltametrik tayin
İlaç

Keywords

Epinephrine
Coating
Electrochemical
behaviour
Voltammetric
determination
Drug

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Adrenalin ([*(R)*-4-(1-hidroksi-2-[metilamino] etil) benzen-1,2-diol], C₉H₁₃N₃O₃) olarak bilinen epinefrin (EP) biyolojik vücut sıvılarında bulunur. EP önemli bir hormondur ve merkezi sinir sistemindeki önemli doğal katekolamin nörotransmitterlerden biridir. EP, sinir pulslarının çeşitli organlara iletilmesinde moderatör görevi görür. Korku veya öfke gibi güçlü duygular hissedilirse, EP kan dolaşımına salınır ve kalp atım hızı, tansiyon ve şeker değerlerinde bir artışa neden olur [1].

EP, kalp atışını uyarmak için ve hipertansiyon, amfizem, miyokard enfarktüsü, alerjik problemler, bronşiyal astım, bronşit, göz hastalıkları ve glokomu tedavi etmek için ilaç olarak yaygın olarak kullanılır [2,3]. Ayrıca, EP, karaciğerdeki glikozun katalitik üretimini artırarak kandaki şeker seviyesinin artışına neden olur ve bu arada yağ hücrelerinde lipitlerin parçalanmasını da teşvik eder [4]. Birçok fizyolojik olay vücut sıvısındaki EP düzeyi ile ilişkilidir [5]. Vücuttaki düşük EP seviyeleri ortostatik hipotansiyon ve parkinson hastalığına yol açarken, yüksek EP seviyeleri ise feokromositoma, hipoglisemi, miyokard enfarktüsüne yol

açabilir [6,7]. Bu nedenle, EP derişiminin farmasötik numuneler ile plazma ve idrar gibi çeşitli biyolojik sıvılarda belirlenmesi farmakolojik araştırmalar, sinir fizyolojisi ve yaşam bilimleri çalışmaları için önemlidir [8]. Literatürde bildirilen EP tayini çalışmalarında kullanılan analiz yöntemlerine yüksek performanslı sıvı kromatografisi (HPLC) [9,10], spektrofotometri [11-13], florimetri [14], kılcal elektroforez [15,16], kemilüminesans [17,18] ve elektrojenlenmiş kemilüminesans [19,20] örnek olarak verilebilir. Bununla birlikte, EP molekülleri kolay yükseltgenebildiği için, son yıllarda EP tayininin elektrokimyasal yöntemler kullanılarak gerçekleştirilmesi ile ilgili çalışmalara sıklıkla yer verilmektedir [21-23]. Ayrıca, elektrokimyasal yöntemler ile tayin işlemlerinin basit ve hızlı olması, herhangi bir ön hazırlık işlemi gerektirmemesi, pahalı ekipmanlara ihtiyaç duymadığı için ve dolayısıyla ucuz yollarla tayine olanak sağlamasından dolayı çok tercih edilmekte ve kullanılan en çekici ve uygun yöntemler arasında yer almaktadır. Yüksek hassasiyet gerekli olmadığında, elektroanalitik çalışmalarda yalnız elektrotların kullanılması, düşük maliyet, zaman tasarrufu, işlem kolaylığı ve uzun süreli kararlılık gibi bazı avantajlar sağlar. Buna karşın, EP'nin elektron transfer hızının yavaş olması ve elektrot yüzeyine adsorbe olmasından dolayı, EP'nin yalnız elektrotlar yüzeyindeki elektrokimyasal tepkisi zayıftır [24,25]. Bu sınırlamaların üstesinden gelmek ve EP'yi belirlemek için, yalnız elektrot yüzeyinin çeşitli maddeler ile modifiye edilmesi etkili bir yöntemdir [21-23]. Literatürde EP tayini için elektrot yüzeyini modifiye etmek amacıyla kullanılan maddeler arasında en yaygın kullanılan maddeler elektrot yüzeyinde polimerleştirilebilir moleküllerdir. Elektrot yüzeyinde polimerize olarak yüzeyi modifiye etmek için kullanılan maddelere indoleasetik asit [21], L-metiyonin [22], eriokrom siyahı [23] ve parlak kresil mavisi/nil mavisi [26] örnek olarak verilebilir. Ayrıca bu amaçla 1,2,4-triazol temel yapısına sahip olan bileşiklerin kullanımı çok geniş çeşitlilikte uygulamalara sahiptir. Altın elektrot kullanılan son çalışmaların bazılarında, triazolün polimerizasyonu ve elektrosorpsiyonu incelenmiştir [27].

EP'nin tespiti için literatürde çeşitli elektroanalitik çalışmalar bildirilmiştir. Askorbik asit varlığında EP tayini için Yang ve arkadaşları sisteamin ve nano-Au esaslı elektrokimyasal sensör geliştirmişlerdir. Hazırladıkları sensör EP'nin yükseltgenmesi işlemi için iyi bir elektrokatalitik tepki göstermiştir [8]. Li ve Sun, camsı karbon elektrot yüzeyini paladyum katkılı poli (L-arginin) ile modifiye etmişlerdir. Bu modifiye elektrot ile EP tayininde CV tekniğini kullanmışlardır. Gerçek numune olarak ilaç numunesi kullanmış ve EP tayinini başarıyla gerçekleştirmişlerdir [28].

Bu çalışmada, 3,5-diamino-1,2,4-triazol (35DT) molekülünün altın elektrot (Au) yüzeyinde elektropolarizasyonu ile modifiye bir yüzey (35DT-Au) hazırlanmıştır. Yalnız Au elektrotla karşılaştırıldığında modifiye edilmiş elektrot, EP'nin yükseltgenme süreci için daha yüksek katalitik aktivite göstermiştir. 35DT-Au yüzeyinde EP'nin elektrokimyasal davranışı DPV ve CV teknikleri kullanılarak incelenmiş ve EP tayini için optimum şartlar belirlenmiştir. Daha sonra, 35DT-Au modifiye elektrot kullanılarak ilaç numunesinde EP tayini yapılmış ve böylece hazırlanan sensörün analitik performansı incelenmiştir.

2. DENEYSEL METOT (EXPERIMENTAL METHOD)

2.1. Kullanılan Kimyasallar ve Cihazlar (Used Chemicals and Devices)

Kullanılan tüm kimyasallar analitik saflıktadır. Çalışmada kullanılan perklorik asit, fosforik asit, 35DT, EP, potasyum klorür (KCl) ve etanol Sigma-Aldrich marka kullanılmıştır. Sodyum fosfat dibazik, borik asit, sodyum fosfat monobazik, hidrojen peroksit, sülfürik asit, sodyum asetat, asetik asit (buzlu) ve sodyum hidroksit Merck marka kullanılmıştır. EP'nin stok çözeltisi günlük olarak, ultra saf su içinde çözünmesiyle 1×10^{-3} M derişiminde hazırlanmıştır. Yüzey kaplaması için kullanılan 1×10^{-3} M 35DT çözeltisi 0,1 M KCl çözeltisinde hazırlanmıştır.

Elektrot yüzeylerinin temizlenmesi işleminde Bandelin marka Sonatax super model ultrasonik banyo kullanılmıştır. Hazırlanan çözeltilerin pH ayarlamaları için oda sıcaklığında Thermo marka Orion 5 Star model dijital pH metre kullanılmıştır. Musluk suyundan ultra saf su ($18,2 \text{ M}\Omega$ direnç) üretimi Millipore marka saflaştırma sistemi ile yapılmıştır.

2.2. Elektrokimyasal ölçümler (Electrochemical measurements)

Elektrokimyasal deneyler, üç elektrotlu ve bilgisayar kontrollü bir potansiyostat (CHI marka ve 660B model) kullanılarak yapılmıştır. Çalışma elektrotu olarak modifiye edilmiş Au elektrotu (BAS, MF-2014, geometrik alan 0,020 cm²), referans elektrot (BAS, MF-2052) olarak Ag/AgCl/KCl(doy.) elektrot ve karşıt elektrot olarak platin tel (BAS, MW-1032) kullanılmıştır. Deneyler 30 cm³ hacimli üç elektrotlu bir elektrokimyasal hücrede gerçekleştirilmiştir. DPV ölçümleri, 0,05V genlik, 0,05 s puls genişliği ve 0,1 s puls periyodu değerlerinde gerçekleştirilmiştir.

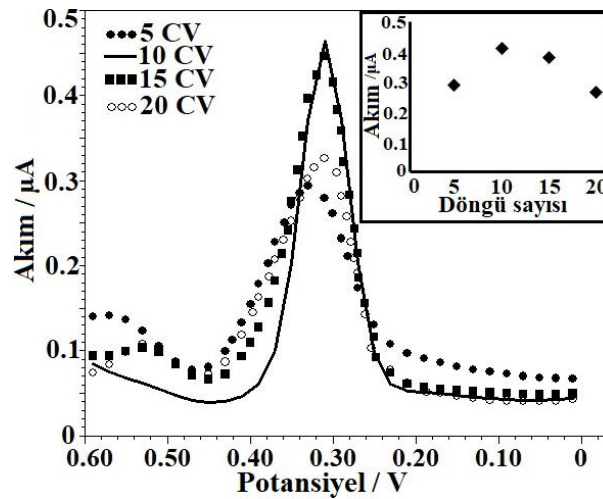
2.3. 35DT-Au modifiye elektrodunun hazırlanması (Preparation of 35DT-Au modified electrode)

Yüzeyin kaplanması işleminden önce, Au elektrotları 5 dakika boyunca Piranha çözeltisinde (%30 H₂O₂ ve der-H₂SO₄; 3:1 (V/V)) bekletilmiştir. Bu elektrotlar ultra saf suyla durulanmış ve parlatma pedi (Buehler®) üzerinde 0,3 ve 0,05 µm boyutlarına sahip süspansiyon şeklindeki alümina tozları ile eşit sayıda dairesel hareketlerle temizlenmiş, parlatılmış ve durulanmıştır. Her biri 15'er dakika olmak üzere, Au elektrot sırasıyla etanol ve su içerisinde sonike edilmiştir [29]. Temizlenmiş Au elektrotlar 35DT çözeltisine daldırılmıştır. 35DT-Au modifiye elektrotlarının modifikasyonu, 0,1 Vs⁻¹ tarama hızı ve 10 çevrim sayısı ile -0,8 ve +1,6V potansiyelleri arasında CV tekniği kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Elektrotlar kullanımdan önce ultra saf suyla durulanmıştır.

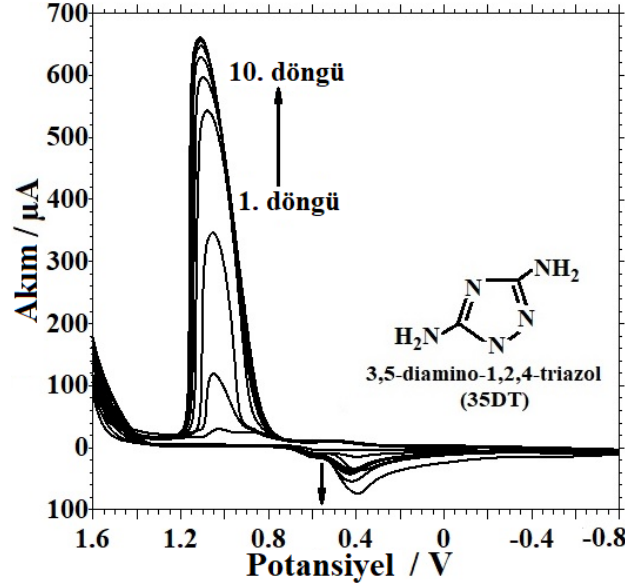
3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

3.1. 35DT-Au modifiye elektrodun hazırlanması (Preparation of 35DT-Au modified electrode)

Yüzey kaplama işleminde ilk önce, uygun olan çevrim sayısına karar verilmiştir. Hazırlanan modifiye elektrot EP tayininde kullanıldığı için, çevrim sayısı değişiminin EP'nin anodik pik akımına olan etkisi incelenmiştir. Uygun olan çevrim sayısını belirlemek için 5, 10, 15, 20 çevrim sayılarında kaplama yapılmıştır. Şekil 1'de, farklı sayıda çevrimle hazırlanan modifiye elektrot ile 3×10⁻⁵ M EP'ye ait diferansiyel puls voltamogramları verilmiştir. EP'nin anodik pik akımı 10 CV'ye kadar yükselmiş ve sonra azalmıştır. Bu nedenle, uygun çevrim sayısı 10 CV olarak seçilmiştir. Şekil 2'de 10 çevrim ile, 35DT moleküllerinin Au yüzeyine polimerizasyonunu gösteren çoklu CV'ler verilmiştir. 35DT için ilk taramada, +0,45 V'da tersinmez indirgenme piki görülmüş ve çevrim sayısı arttıkça, bu pikin akımı artmıştır. İlk taramada, 35DT için +1,1 V'da çok küçük bir yükseltgenme piki görülmüş ve ikinci çevrimden itibaren bu pikin akımı artış göstermiştir. Şekil 2'de görüldüğü gibi, 35DT'ye ait anodik pik akımı her bir çevrimde artmış ve bir süre sonra sabit bir değere ulaşmıştır. Bu durum, her bir tarama ile 35DT moleküllerinin Au elektrot yüzeyinde elektropolimerize olarak biriktiğini göstermektedir.



Şekil 1. Farklı çevrim sayıları (5, 10, 15, 20) ile kaplanmış 35DT-Au modifiye elektrot ile 3×10⁻⁵ M EP'ye ait diferansiyel puls voltamogramları ve çevrim sayısına karşı EP'nin anodik pik akımı grafiği

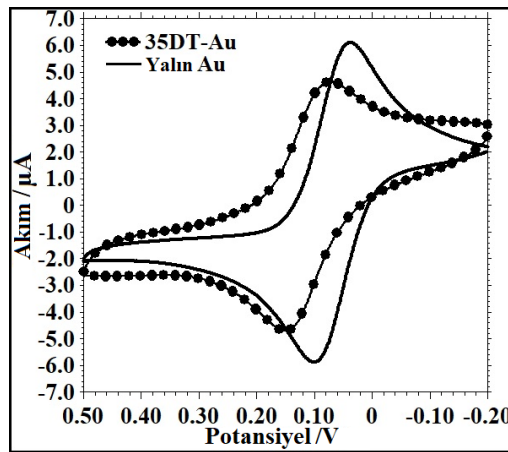


Şekil 2. Yalın Au elektrot yüzeyine 35DT moleküllerinin 10 çevrim ile kaplanmasına ait çoklu-dönüşümlü voltamogram.

3.2. 35DT-Au modifiye elektrodun dönüşümlü voltametri ile karakterizasyonu

(Characterization of 35DT-Au modified electrode by cyclic voltammetry)

Modifiye elektrot yüzeylerinin karakterizasyon işlemi, $K_3Fe(CN)_6/K_4Fe(CN)_6$ molekülleri sıklıkla elektrokimyasal prob olarak kullanılmaktadır [30,31]. $Fe(CN)_6^{3-/4-}$ moleküllerinin dönüşümlü voltamogramları alınarak yalın ve modifiye yüzey birbiri ile karşılaştırılmıştır. Şekil 3, derişimleri 1'er mM olan $Fe(CN)_6^{3-/4-}$ moleküllerinin, yalın Au ve 35DT-Au elektrotları yüzeyinde elde edilen CV'lerini göstermiştir. Yalın Au ve 35DT-Au elektrot yüzeylerinin her ikisinde de redoks probunun tersinir indirgenme ve yükseltgenme pikleri görülmüştür. $Fe(CN)_6^{3-/4-}$ moleküllerinin pik akımlarında modifikasyon işleminden sonra bir miktar azalma olduğu görülmüştür. Bununla birlikte, katodik ve anodik tepe noktalarının potansiyelleri arasındaki fark, yalın Au ve 35DT-Au elektrotlarında sırasıyla 0,060 ve 0,085 V olmuştur. Elektrot yüzeylerinde $Fe(CN)_6^{3-/4-}$ piklerinin akımlarının ve potansiyellerinin farklı olması, Au elektrot yüzeyinin 35DT filmi ile modifiye olduğunu göstermektedir.



Şekil 3. Yalın Au ve 35DT-Au elektrot yüzeylerinde $1,0 \times 10^{-3} M Fe(CN)_6^{3-/4-}$ (0,1 M KCl içerisinde) elektrokimyasal problemlerinin dönüşümlü voltamogramları, tarama hızı $0,1 Vs^{-1}$.

3.3. 35DT-Au modifiye elektrot yüzeyinde EP'nin elektrokimyasal davranışı

(Electrochemical behavior of EP on the 35DT-Au modified electrode surface)

3.3.1. Destek elektrolit türünün ve pH'nın EP'nin yükseltgenme pikine etkisi

(Effect of support electrolyte and its pH on the oxidation peak of EP)

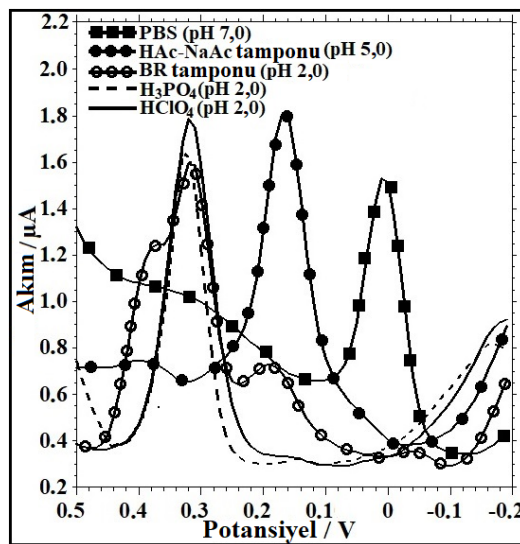
EP'ye ait anodik pik akımı, destek elektrolit çözeltisinin türünden (DE) ve onun pH değerinden etkilenir [32-34]. DE'nin EP'nin anodik pik akımına etkisi DPV tekniği kullanılarak incelenmiştir (Şekil 4). Bu amaçla, fosfat tamponu (PBS) (pH 7,0), britton-robinson tamponu (BR) (pH 2,0), asetat tamponu (NaAc-HAc) (pH 3,0), perklorik asit (pH 2,0) (HClO₄) ve fosforik asit (pH 2,0) (H₃PO₄) ortamları kullanılmıştır. Bu ortamlarda, 2,5 x 10⁻⁴ mol L⁻¹ EP'nin anodik pik akım değerleri sırasıyla 1,02, 1,05, 1,28, 1,44 ve 1,30 µA olarak bulunmuştur. Şekil 4'de görüldüğü gibi, EP'nin anodik pik akımının en büyük değeri HClO₄ çözeltisinde elde edilmiştir. Bu nedenle, HClO₄ çözeltisi DE olarak seçilmiştir.

DE ortamının pH etkisini incelemek için 1,0 ve 5,0 pH aralığında HClO₄ çözeltileri hazırlanmıştır. 2,5x10⁻⁴ M EP'nin diferansiyel puls voltamogramları Şekil 5A'da verilmiştir. EP'nin anodik pik akım değeri, çözeltinin pH değişiminden (Şekil 5B) etkilenmiştir. En büyük pik akım değeri pH 2,0 HClO₄ çözeltisinde elde edilmiştir. Bu nedenle, en uygun DE ortamı olarak pH 2,0 HClO₄ olarak seçilmiştir. Bu ortamda EP'nin pik potansiyeli yaklaşık 0,32 V değerindedir. Bununla birlikte, pH değeri büyüdükçe, EP'nin anodik pik potansiyeli (E_{pa}) negatife kaymaktadır (Şekil 5C). Bu durum, EP'nin yükseltgenme tepkimesinin doğrudan protonlarla ilişkili olduğunu göstermektedir. Şekil 5C'de E_{pa}'nın pH ile değişim grafiği verilmiştir. Elde edilen doğru denklemi Eş. 1'de verilmiştir. Ayrıca, Eş. 2'de verilen Nernst denklemi [34] kullanılarak m/n değeri 0,97 (yaklaşık 1) olarak hesaplanmıştır. Bu sonuç, EP'nin yükseltgenme sürecinde proton ve elektron sayılarının eşit olduğunu göstermektedir. Eş. 2'de R gaz sabitini (8.314 JK⁻¹ mol⁻¹), T sıcaklığı (298,15 K), F faraday sabitini (96485 C mol⁻¹), n ve m ise sırasıyla elektron ve proton sayılarını ifade etmektedir.

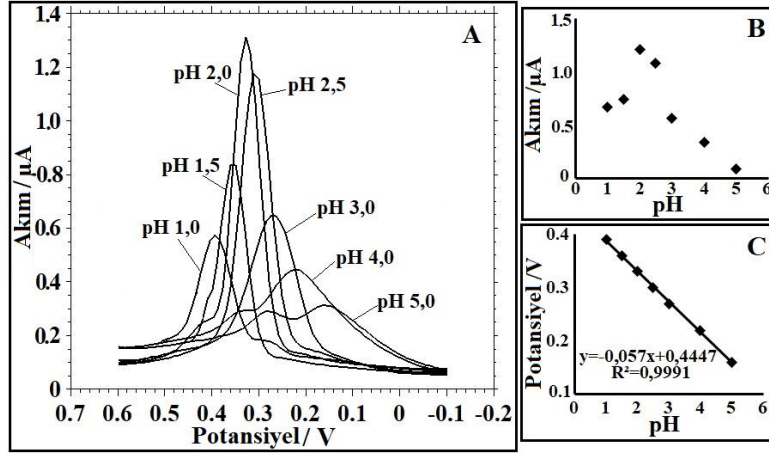
$$E_{pa} = -0,0570 \text{ pH} + 0,4447 \quad (R^2 = 0,9991) \quad 1$$

$$dE_p/dpH = 2,303mRT/nF \quad 2$$

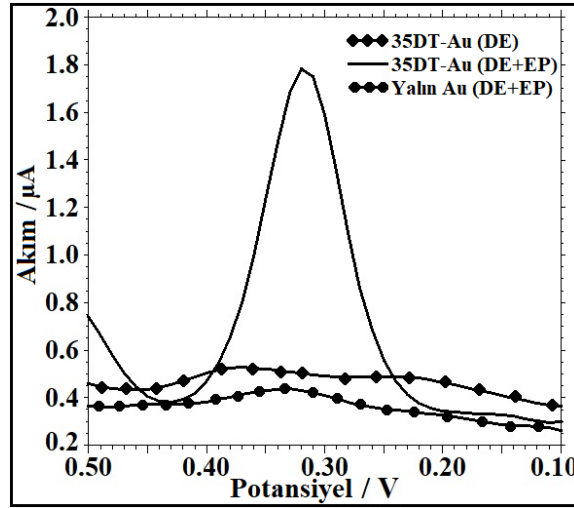
Şekil 6'da, pH 2,0 HClO₄ ortamında yalnız Au ve 35DT-Au modifiye elektrotlar ile elde edilmiş 2,5x10⁻⁴ M EP'ye ait DPV'ler verilmiştir. EP'nin anodik pik potansiyeli, yalnız ve modifiye elektrotlarda sırasıyla 0,33 ve 0,32 V'da görülmektedir. EP'nin anodik pik akım değeri, 35DT-Au ile modifiye edilmiş elektrot ile 1,44 x 10⁻⁶ A'dır. Bu değer, yalnız Au elektrotla elde edilen değerden (1,10x10⁻⁷ A) 13,1 kat daha büyüktür. Bu sonuç, EP tayini için 35DT-Au'nin iyi bir alternatif elektrot olduğunu göstermektedir.



Şekil 4. Farklı destek elektrolit ortamlarında 2,5x10⁻⁴ M EP'nin 35DT-Au modifiye elektrot ile alınmış diferansiyel puls voltamogramları.



Şekil 5. A. 35DT-Au modifiye elektrot yüzeyinde farklı pH değerlerindeki (1,0, 1,5, 2,0, 2,5, 3,0, 4,0 ve 5,0) $HClO_4$ çözeltisinde $2,5 \times 10^{-4}$ M EP'nin diferansiyel puls voltamogramları (A), pH'ya karşı akım (B) ve potansiyel grafiği (C).



Şekil 6. pH 2,0 $HClO_4$ destek elektrolit ortamında $2,5 \times 10^{-4}$ M EP'nin varlığında ve yokluğunda elde edilmiş diferansiyel puls voltamogramları

3.3.2. Tarama hızının etkisi (Effect of the scan rate)

0,01 ve 0,5 Vs^{-1} arasında değişen tarama hızlarının, 35DT-Au modifiye elektrot yüzeyinde 10 μM EP'nin yükseltgenme ve indirgenmesine olan etkisi incelenmiş ve elde edilen CV'ler Şekil 7A'da verilmiştir. Tarama hızı arttığında, katodik ve anodik pik akımları kademeli olarak artmıştır. Şekil 7B'de, tarama hızının (ν) artışı ile anodik ve katodik pik akım değerlerinin (I_{pa} ve I_{pc}) arttığı ancak bu artışın doğrusal bir artış olmadığı görülmektedir. Bu durum EP'nin redoks sürecinin difüzyon kontrollü olduğunu göstermektedir [35]. Şekil 7C'de I_{pa} ve I_{pc} değerlerinin tarama hızının karekökü ($\nu^{1/2}$) ile doğrusal bir ilişki gösterdiği görülmektedir. I_p ile $\nu^{1/2}$ arasındaki değişimi ifade eden doğru denklemleri sırasıyla Eş. 3 ve 4'de verilmiştir.

$$I_{pa} (\mu A) = 1,8740 \nu^{1/2} (Vs^{-1}) + 0,0304 (R^2 = 0,9953) \quad 3$$

$$I_{pc} (\mu A) = - 2,0319 \nu^{1/2} (Vs^{-1}) + 0,0113 (R^2 = 0,9990) \quad 4$$

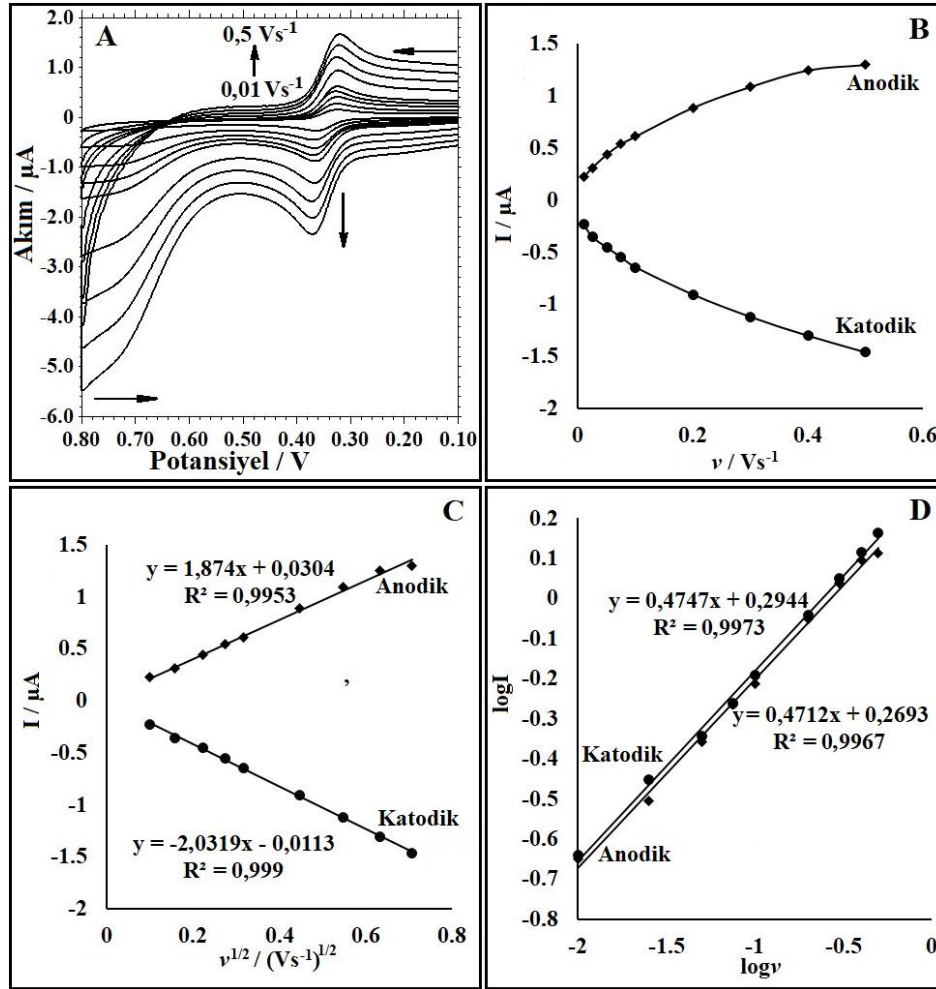
Eş. 3 ve Eş. 4'de görüldüğü gibi $I_p - \nu^{1/2}$ arasındaki doğrusal ilişki, redoks sürecinin difüzyon kontrollü olduğunu doğrulamaktadır [36]. Şekil 7D'de $\log \nu$ ve $\log I_p$ arasında doğrusal bir ilişki bulunmaktadır ve aralarındaki doğru denklemleri Eş. 5 ve 6'da verilmiştir.

$$\log I_{pa} (\mu A) = 0,4712 \log \nu (Vs^{-1}) + 0,2693 (R^2 = 0,9967) \quad 5$$

$$\log I_{pc} (\mu A) = 0,4747 \log v (Vs^{-1}) + 0,2944 (R^2 = 0,9973)$$

6

$\log v$ - $\log I_p$ grafiklerinin eğim değeri redoks süreçlerinin difüzyon yada adsorpsiyon kontrollü oluşları ile bilgi vermektedir. Difüzyon kontrollü işlemlerde eğim değeri olarak 0,5 değeri teorik değerdir [37]. Eş. 5 ve 6'da, anodik ve katodik süreçler için eğim değerleri sırasıyla 0,4712 ve 0,4747 olarak elde edilmiştir. Bu değerler EP'nin modifiye yüzeyde gerçekleşen redoks süreçlerinin difüzyon kontrollü olduğunu göstermektedir [37].



Şekil 7. pH 2,0 $HClO_4$ destek elektrolit ortamında 1×10^{-5} M EP'nin farklı tarama hızlarında alınmış dönüşümlü voltamogramı (A), tarama hızına karşı akım grafiği (B), tarama hızının kareköküne karşı akım grafiği (C), $\log v$ 'ye karşı $\log I$ grafiği (D).

3.4. 35DT-Au modifiye elektrodun analitik performansı, kalibrasyon eğrisi ve gözlenebilirlik sınırı (Analytical performance, calibration curve and limit of detection of the 35DT-Au modified electrode)

35DT-Au elektrodunun analitik performansı incelenmiştir. Şekil 8'de verilen voltamogramlardan, artan EP derişimi ile anodik pik akım değerlerinin arttığı görülmektedir. Oluşturulan kalibrasyon grafiğinde, eğimi farklı, $0,9-32,31 \mu M$ ve $32,31-1050 \mu M$ olmak üzere iki doğrusal çalışma aralığı görülmektedir. Bu iki bölge için elde edilen doğru denklemleri Eş. 7 ve 8'de verilmiştir. Ayrıca birinci ve ikinci doğrusal bölgelerin kalibrasyon hassasiyetleri sırasıyla yaklaşık olarak $0,58$ ve $0,01 \mu A/\mu M$ olarak hesaplanmıştır.

$$I_p(\mu A) = 0,0030 [EP] (\mu M) + 0,5789 (R^2 = 0,9940) \quad 7$$

$$I_p(\mu A) = 0,0122 [EP] (\mu M) + 0,0103 (R^2 = 0,9979) \quad 8$$

Bu iki çalışma aralığı için gözlenebilme sınırları (LOD) sırasıyla, 0,39 μM ve 12,35 μM olarak bulunmuştur. Tayin sınırları (LOQ) ise sırasıyla, 1,3 μM ve 41,2 μM olarak hesaplanmıştır. Bunun için Eş. 9 ve 10'da verilen formüller kullanılarak sırasıyla LOD ve LOQ değerleri hesaplanmıştır. Bu eşitliklerde k kalibrasyon grafiğinden elde edilen doğrunun eğimini ve S_b standart sapmayı ifade eder. Yapılan çalışmanın analitik performansının literatürdeki bazı çalışmalarla olan karşılaştırması Tablo 1'de verilmiştir. Literatürde, bu çalışmanınkinden daha düşük değerlerde elde edilmiş LOD değerleri mevcuttur [38, 40]. Ancak bu çalışmada kullanılan 35DT-Au modifiye elektrot EP tayini için geniş bir çalışma aralığına sahip olması açısından iyi bir analitik performans sergilemiştir.

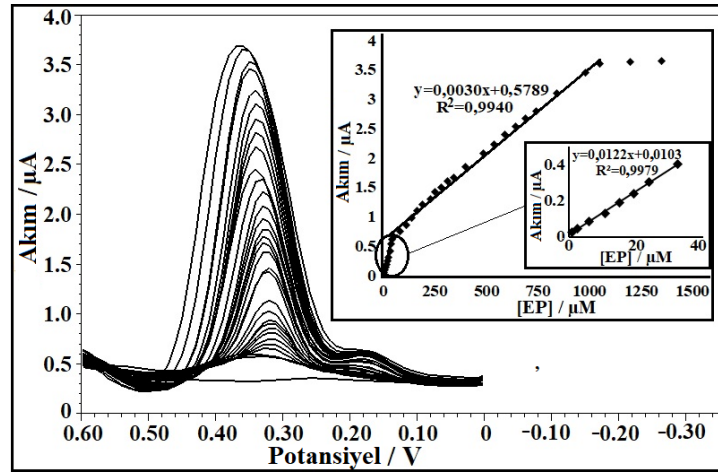
$$\text{LOD} = 3S_b/k \quad 9$$

$$\text{LOQ} = 10S_b/k \quad 10$$

Tablo 1. 35DT-Au modifiye elektrodunun analitik performansının literatürdeki bazı çalışmalarla karşılaştırılması

Elektrot	Yöntem	Çalışma aralığı (μM)	LOD (μM)	Kaynak
TTAB ^a /CPE ^b	DPV	0,15–30	0,12	[38]
SWCNT ^c -GCE ^d /	CV	10–110	2,54	[39]
MCF ^e /GCE	DPAS	0,1-12	0,04	[40]
MWCNT ^h /GCE	DPV	22,5–547	3,92	[41]
35DT-Au	DPV	0,9–32,31 ve 32,31–1050	0,39 ve 12,35	Bu çalışma

^aTetradesiltrimetil amonyum bromür, ^bkarbon pasta elektrot, ^ctek duvarlı karbon nanotüp, ^dcamısı karbon elektrot, ^egözenekli karbon sünger, ^hçok duvarlı karbon nanotüp

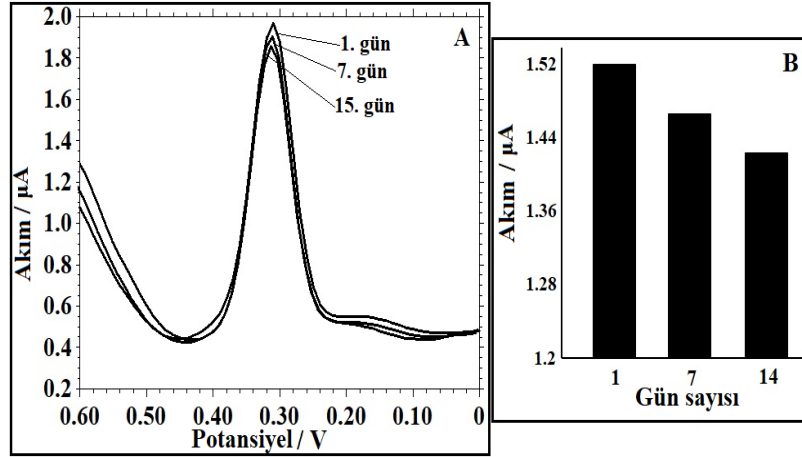


Şekil 8. pH 2,0 HClO₄ destek elektrolit ortamında farklı derişimlerde EP (0, 0,9, 2,5, 6,0, 10,7, 15,3, 19,2, 23,8, 32,3, 35,8, 41,0, 52,0, 80,5, 110, 138, 164, 188, 228, 250, 280, 310, 340, 400, 486, 538 590, 642, 692, 742, 841, 980, 1050, 1200, 1350 μM) ilavesi ile elde edilen diferansiyel puls voltamogramları ve EP derişimine karşı akım grafiği (kalibrasyon grafiği).

3.5. 35DT-Au modifiye elektrodunun tekrarlanabilirlik ve kararlılık çalışmaları (Reproducibility and stability studies of the 35DT-Au modified electrode)

35DT-Au sensörünün tekrarlanabilirliği ilk olarak, tek bir 35DT-Au modifiye elektrot yüzeyinde, $2,5 \times 10^{-4}$ M EP'nin pik akımları elde edilerek değerlendirilmiştir. %BSS (yüzde bağıl standart sapma) değeri tekrarlanan altı ölçüm sonucunda %0,41 olarak bulunmuştur. Bunun ardından 35DT-Au modifiye elektrodunun hazırlanması ile ilgili olarak tekrarlanabilirlik çalışması yapılmıştır. Aynı şekilde hazırlanmış farklı altı 35DT-Au elektrot ile EP'ye ait pik akım değerleri için % BSS değeri % 2,37 olarak

hesaplanmıştır. Elde edilen bu %BSS değerleri, 35DT-Au modifiye elektrodu ile EP tayininde tekrarlanabilirliğin iyi olduğunu göstermiştir. Ayrıca modifiye elektrodun kararlılığı, kuru şartlarda oda sıcaklığında değerlendirilmiştir. 35DT-Au elektrodun hazırlandığı gün (1. gün) EP'ye ait pik akım değeri belirlenmiştir. Bunu takip eden 7. ve 15. günlerde de aynı işlem yapılmış ve elde edilen voltamogramlar Şekil 9A'da gösterilmiştir. Gün sayısına göre değişen akım grafiği Şekil 9B'de verilmiştir. 7. ve 15. gün sonunda, EP'nin pik akımları sırasıyla % 3,5 ve % 6,3 düşüş göstermiştir. Bu sonuçlar göstermektedir ki, 35DT-Au modifiye elektrodu, EP'nin voltametrik tespiti için yüksek kararlılık ve iyi bir tekrarlanabilirlik göstermektedir.



Şekil 9. 35DT-Au elektrodunun hazırlandığı gün ile hazırlanışının 7. ve 15. günlerinde kullanımıyla $2,5 \times 10^{-4}$ M EP içeren pH 2,5 HClO₄ ortamında elde edilen diferansiyel puls voltamogramları (A), elde edilen pik akımlarının güne karşı değişimini gösteren grafik (B).

3.6. Girişim etkisi (Effect of interferences)

Hazırlanan 35DT-Au modifiye elektrodunun seçiciliğinin değerlendirmek için, EP tayinine girişim yapabilecek olası türlerin etkisi incelenmiştir. Bu amaçla, 50 µM EP içeren DE ortamına bu türler eklenmiştir. 500 kat K⁺, Na⁺, Mg²⁺, Ca²⁺, Cl⁻, CO₃²⁻, SO₄²⁻, NO₃; 200 kat derişimde fruktoz, glukoz, oksalik asit, benzoik asit, Zn²⁺, PO₄³⁻, Fe³⁺, Co³⁺; 100 kat sakaroz, tirozin, triptofan; 50 kat etanol, metanol, histidin; 25 kat alanin, Al³⁺, Sn²⁺, Cu²⁺, Bi³⁺; 10 kat kafein, üre, levodopa, dopamin, askorbik asit, Ni²⁺ ilaveleri EP'nin anodik pik akım değerini %5'den daha az etkilemiştir. Bu sonuçlar, 35DT-Au modifiye elektrodun EP tayini için iyi bir seçiciliğe sahip olduğunu göstermiştir.

3.7. Gerçek örnek analizi (Analysis of real sample)

35DT-Au elektrodunun analitik performansını değerlendirmek için, standart ekleme yöntemi kullanılarak epinefrin hidroklorür ilaç numunesinde EP tayini yapılmıştır. İlaç numunesi tek kullanımlık bir ampul olarak 1 mL'lik hacimdedir ve 0,5 g/mL derişiminde EP içermektedir. İlaç numunesinin pH 2,0 HClO₄ ile 10 mL hacimde olacak şekilde seyreltilmesiyle stok ilaç numunesi hazırlanmıştır. Daha sonra, içinde DE bulunan elektrokimyasal hücreye önce bilinen hacimde stok ilaç numunesi (5 µM ve 15 µM EP olacak şekilde) ve bunun üzerine bilinen derişimlerde EP çözeltileri eklenmiş ve her birinin DPV'leri kaydedilmiştir. Standart ekleme yöntemi ile EP analizi yapılmış, %geri kazanım, %BSS ve %bias değerleri hesaplanmıştır. Şekil 10'da 5 µM EP içeren ilaç numunesinin analizine ait voltamogramlar verilmiştir. Üç kez tekrarlanan deney sonuçlarının değerlendirilmesi Tablo 2'de verilmiştir. Tablo 2'ye göre, %geri kazanım değerleri 96.0 ile 100.4 arasındadır. Ayrıca ilaç numunesinde, EP tayini için kesinlik ve doğruluk çalışmaları sırasıyla %BSS ve %bias ile ifade edilmiştir. 5 µM ve 15 µM EP içeren ilaç numunelerinin tayini için %bias değerleri sırasıyla %0,4 ve -%4,07; %BSS değerleri ise sırasıyla %0,4 ve %2,72 olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar, 35DT-Au modifiye elektrodunun EP tayini için iyi bir analitik performans sergilediğini göstermiştir.

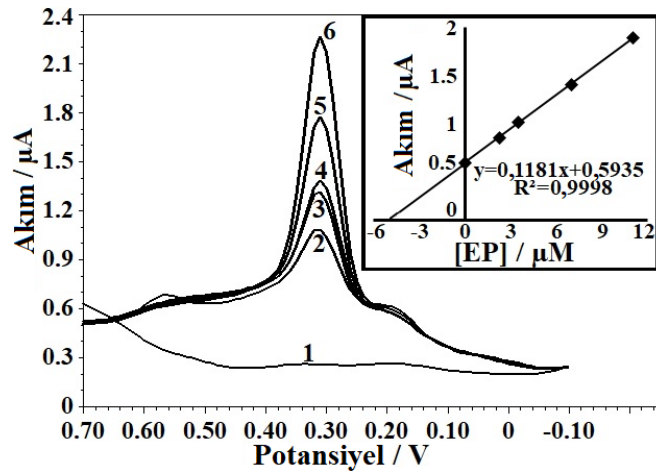
Table 2. 35DT-Au modifiye elektrotla yapılan ilaç numunesinde EP tayinine ait veriler

Eklene[n] [EP] (μM)	Bulunan [EP] (μM)	Kesinlik %BSS	Doğruluk Bias%	%Geri kazanım
0	-	-	-	-
5	5,02±0,02	0,4	0,4	100,4
15	14,39±0,39	2,72	-4,07	96,0

$$\%BSS = (S/X) \times 100$$

$$\%Bias = [(Bulunan[EP] - Eklene[n][EP]) / Eklene[n][EP]] \times 100$$

$$\%Geri\ kazanım = (Bulunan[EP] / Eklene[n][EP]) \times 100$$



Şekil 10. İlaç numunesinde EP tayini için yapılan ilavelere karşı elde edilen diferansiyel puls voltamogramları ve EP derişimine karşı çizilen akım grafiği (1) pH 2,0 HClO₄ çözeltisi, (2) stok ilaç numunesi, (3) 2,25 μM EP, (4) 3,5 μM EP, (5) 7 μM EP and (6) 11 μM EP.

4. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada, EP tayini için 3,5-diamino-1,2,4-triazol ile modifiye edilmiş bir altın elektrot kullanılmıştır. EP'nin vücut sıvısındaki derişim değerinin normal seviyesinden daha düşük yada yüksek olmasının çeşitli hastalıklara yol açması sebebiyle, EP tayini için metot geliştirilmesi önemlidir. Modifiye elektrot, literatürdeki alternatif metotlarla hazırlanan modifiye elektrotlara kıyasla geniş bir doğrusal çalışma aralığı göstermiştir. Ayrıca, bu sensörün hazırlanması basit ve hızlı bir işlemdir. Önerilen sensör (35DT-Au) hassasiyet, seçicilik, kısa ölçüm süresi, hazırlama kolaylığı, iyi bir doğruluk ve iyi bir analitik performans sağlamıştır. 35DT-Au modifiye elektrot, daha önce bildirilen modifiye elektrotlara kıyasla en düşük EP saptama sınırına sahip olmamasına rağmen, 35DT-Au elektrotunun hazırlanışının basit ve hızlı bir işlem olması, herhangi bir ön işlem gerektirmemesi, tatmin edici ölçüde kararlılık ve tekrarlanabilirlik göstermesinden dolayı EP tayini açısından literatürdeki mevcut çalışmalara iyi bir alternatif sunmaktadır. Ayrıca modifiye elektrot ile gerçek numunede EP tayini başarıyla uygulanmıştır.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışma, Gazi Üniversitesi Fen Fakültesi'nde yapıldı. Çalışma, Gazi Üniversitesi Araştırma Projesi Birimi (Proje No: 65/2019- 02) tarafından desteklenmiştir. Katkılarından dolayı Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne teşekkürlerimi sunarım.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Bahmanzadeh, S., Noroozifar, M., “Fabrication of modified carbon paste electrodes with Ni-doped Lewatit FO36 nano ion exchange resin for simultaneous determination of epinephrine, paracetamol and tryptophan” *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 809: 153-162, (2018).
- [2] Shen, T., Wang, J.Y., Zhao, B.D., *Biochemistry*, Higher Education Press, Beijing, 1986.
- [3] Wang, J., Deo, R. P., Poulin, P., Mangey, M., “Carbon nanotube fiber microelectrodes” *Journal of the American Chemical Society*, 125(48): 14706-14707, (2003).
- [4] Clark, M. G., Colquhoun, E. Q., Rattigan, S., Dora, K. A., Eldershaw, T. P., Hall, J. L., Ye, J., “Vascular and endocrine control of muscle metabolism” *American Journal of Physiology-Endocrinology And Metabolism*, 268(5): E797-E812, (1995).
- [5] Thivya, P., Wilson, J., “Electron rays irradiated polyaniline anchored over bovine serum albumin for simultaneous detection of epinephrine and uric acid” *Microchemical Journal*, 145, 883-891, (2019).
- [6] Thanh, T.D., Balamurugan, J., Tuan, N.T., Jeong, H., Lee, S.H., Kim, N.H., et al. “Enhanced electrocatalytic performance of an ultrafine AuPt nanoalloy framework embedded in graphene towards epinephrine sensing” *Biosens Bioelectron.*, 89: 750-757, (2017).
- [7] Lavanya, N., Fazio, E., Neri, F., Bonavita, A., Leonardi, S.G., Neri, G., et al. “Simultaneous electrochemical determination of epinephrine and uric acid in the presence of ascorbic acid using SnO₂/graphene nanocomposite modified glassy carbon electrode” *Sensor Actuator B.*, 221: 1412-1422, (2015).
- [8] Yang, Z., Hu, G., Chen, X., Zhao, J., Zhao, G. “The nano-Au self-assembled glassy carbon electrode for selective determination of epinephrine in the presence of ascorbic acid” *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 54(2): 230-235, (2007).
- [9] Fotopoulou, M. A., Ioannou, P. C., “Post-column terbium complexation and sensitized fluorescence detection for the determination of norepinephrine, epinephrine and dopamine using high-performance liquid chromatography” *Anal. Chim. Acta*, 462: 179-185, (2002).
- [10] Shelkownikov, S., Gonick, H. C., “Peroxyxynitrite but not nitric oxide donors destroys epinephrine: HPLC measurement and rat aorta contractility” *Life sci.*, 75: 2765-2773, (2004).
- [11] Kim, S. H., Lee, J. W., Yeo, I. H. “Spectroelectrochemical and electrochemical behavior of epinephrine at a gold electrode” *Electrochimica acta*, 45(18): 2889-2895, (2000).
- [12] Sorouraddin, M. H., Manzoori, J. L., Kargarzadeh, E., Shabani, A. H., “Spectrophotometric determination of some catecholamine drugs using sodium bismuthate” *J. of Phar. Biomed. Anal.*, 18(4-5): 877-881, (1998).
- [13] Zhu, M., Huang, X., Li, J., Shen, H., “Peroxidase-based spectrophotometric methods for the determination of ascorbic acid, norepinephrine, epinephrine, dopamine and levodopa” *Anal. Chim. Acta*, 357(3): 261-267, (1997).
- [14] Cardoso, C. E., Martins, R. O., Telles, C. A., Aucélio, R. Q., “Sequential determination of hydrocortisone and epinephrine in pharmaceutical formulations via photochemically enhanced fluorescence” *Microchim. Acta*, 146(1): 79-84, (2004).
- [15] Li, T., Wang, Z., Xie, H., Fu, Z., “Highly sensitive trivalent copper chelate-luminol chemiluminescence system for capillary electrophoresis detection of epinephrine in the urine of smoker” *Journal of Chromatography B*, 911: 1-5, (2012).

- [16] Peterson, T. E., Trowbridge, D., “Quantitation of l-epinephrine and determination of the d-/l-epinephrine enantiomer ratio in a pharmaceutical formulation by capillary electrophoresis” *Journal of Chromatography A*, 603(1-2): 298-301, (1992).
- [17] Qiu, H., Luo, C., Sun, M., Lu, F., Fan, L., Li, X., “A chemiluminescence sensor for determination of epinephrine using graphene oxide–magnetite-molecularly imprinted polymers” *Carbon*, 50(11): 4052-4060, (2012).
- [18] Michałowski, J., Hałaburda, P., “Flow-injection chemiluminescence determination of epinephrine in pharmaceutical preparations using raw apple juice as enzyme source” *Talanta*, 55(6): 1165-1171, (2001).
- [19] Liu, Y., Liu, Z., Shi, Y., “Sensitive determination of epinephrine in pharmaceutical preparation by flow injection coupled with chemiluminescence detection and mechanism study” *Luminescence*, 26(1): 59-64, (2011).
- [20] Bai, J., Shi, H., Zhang, Y., Tian, D., Xu, X., & Kang, W., “Determination of Epinephrine by Flow Injection Analysis Coupled Ag (III) Complex- Luminol Chemiluminescence Detection” *Chinese Journal of Chemistry*, 27(4): 745-750, (2009).
- [21] Zhou, Y., He, M., Huang, C., Dong, S., Zheng, J., “A novel and simple biosensor based on poly (indoleacetic acid) film and its application for simultaneous electrochemical determination of dopamine and epinephrine in the presence of ascorbic acid” *Journal of solid state electrochemistry*, 16(6): 2203-2210, (2012).
- [22] Tiyek, İ., Ersoy, M. S., Alma, M. H., Dönmez, U., Yıldırım, B., Salan, T., Yıldız, K. “Modifiye Hummers Yöntemiyle Grafen Oksit (GO) Sentezi ve Karakterizasyonu” *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 4(2), 41-48, (2016).
- [23] Yao, H., Sun, Y., Lin, X., Tang, Y., Liu, A., Li, G., Zhang, S., “Selective determination of epinephrine in the presence of ascorbic acid and uric acid by electrocatalytic oxidation at poly(eriochrome black T) film-modified glassy carbon electrode” *Analytical sciences*, 23(6): 677-682, (2007).
- [24] Ghica, M. E., Brett, C. M., “Simple and efficient epinephrine sensor based on carbon nanotube modified carbon film electrodes” *Analytical Letters*, 46(9): 1379-1393, (2013).
- [25] Zhang, H. M., Zhou, X. L., Hui, R. T., Li, N. Q., Liu, D. P., “Studies of the electrochemical behavior of epinephrine at a homocysteine self-assembled electrode” *Talanta*, 56(6): 1081-1088, (2002).
- [26] Tomé, L. I., Brett, C. M., “Polymer/Iron Oxide Nanoparticle Modified Glassy Carbon Electrodes for the Enhanced Detection of Epinephrine” *Electroanalysis*, 31(4): 704-710, (2019).
- [27] Danyıldız, Z., Uzun, D., Tabanlıgil Calam, T., Hasdemir, E., “A voltammetric sensor based on glassy carbon electrode modified with 1H-1, 2, 4-triazole-3-thiol coating for rapid determination of trace lead ions in acetate buffer solution” *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 805: 177-183, (2017).
- [28] Li, H., Sun, D., “Simple and efficient epinephrine sensor based on palladium doped poly (L-arginine) modified electrode” *Asian Journal of Chemistry*, 27(7): 2539-2544, (2015).
- [29] Tabanlıgil Calam, T., “Analytical application of the poly (1H-1, 2, 4-triazole-3-thiol) modified gold electrode for high-sensitive voltammetric determination of catechol in tap and lake water samples” *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 99(13): 1298-1312, (2019). <https://doi.org/10.1080/03067319.2019.1619716>
- [30] Tabanlıgil Calam, T., Hasdemir, E., “Comparative characterizations of self-assembled monolayers of 1, 6-hexanedithiol and 1-hexanethiol formed on polycrystalline gold electrode” *Comptes rendus de l’Académie bulgare des Sciences*, 72(3): 316-326, (2019).

- [31] Tatli, F., Uzun, D., Tabanlıgil Calam, T., Gündüzalp, A. B., Hasdemir, E., "Preparation and characterization of 3- [(1H- 1, 2, 4- triazole- 3- ylimino) methyl] naphtalene- 2- ol film at the platinum surface for selective voltammetric determination of dopamine in the presence of uric acid and ascorbic acid" *Surface and Interface Analysis*, 51(4): 475-483, (2019).
- [32] Tabanlıgil Calam, T., Uzun, D., "Rapid and Selective Determination of Vanillin in the Presence of Caffeine, its Electrochemical Behavior on an Au Electrode Electropolymerized with 3- amino-1,2,4- triazole- 5- thiol" *Electroanalysis*, 31: 2347-2358, (2019). <https://doi.org/10.1002/elan.201900328>.
- [33] Tabanlıgil Calam, T., Hasdemir, E., "Application of 1, 6-hexanedithiol and 1-hexanethiol self-assembled monolayers on polycrystalline gold electrode for determination of Fe (II) using square wave voltammetry" *Gazi University Journal of Science*, 31(1): 53-64, (2018).
- [34] Ghazizadeh, A. J., Afkhami, A., Bagheri, H., "Voltammetric determination of 4-nitrophenol using a glassy carbon electrode modified with a gold-ZnO-SiO₂ nanostructure" *Microchim. Acta*, 185(6): 296-306, (2018).
- [39] Aghaei, R., Mazloum-Ardakani, M., Abdollahi-Alibeik, M., Moaddeli, A., "Electrochemical sensor based on multi-walled carbon nanotubes and 4-(((4-mercaptophenyl) imino) methyl) benzene-1, 2-diol for simultaneous determination of epinephrine in the presence of acetaminophen" *Trends in Pharmaceutical Sciences*, 4(3): 139-148, (2018).
- [36] Tabanlıgil Calam, T., "Electrochemical oxidative determination and electrochemical behavior of 4-nitrophenol based on an Au electrode modified with electro-polymerized 3,5-diamino-1,2,4-triazole film" *Electroanalysis*, DOI: 10.1002/elan.201900450.
- [37] He, D., Zhang, P., Li, S., Luo, H., "A novel free-standing CVD graphene platform electrode modified with AuPt hybrid nanoparticles and L-cysteine for the selective determination of epinephrine" *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 823: 678-687, (2018).
- [38] Shankar, S. S., & Swamy, B. K., "Detection of epinephrine in presence of serotonin and ascorbic acid by TTAB modified carbon paste electrode: a voltammetric study" *Int. J. Electrochem. Sci.*, 9(3): 1321-1339, (2014).
- [39] Apetrei, I. M., Apetrei, C., "Biosensor based on tyrosinase immobilized on a single-walled carbon nanotube-modified glassy carbon electrode for detection of epinephrine" *International Journal of Nanomedicine*, 8: 4391-4398, (2013).
- [40] Jahanbakhshi, M., "Mesoporous carbon foam, synthesized via modified Pechini method, in a new dispersant of Salep as a novel substrate for electroanalytical determination of epinephrine in the presence of uric acid" *Materials Science and Engineering: C*, 70: 544-551, (2017).
- [41] Tohidinia, M., Noroozifar, M., "Investigation of Carbon Allotropes for Simultaneous Determination of Ascorbic Acid, Epinephrine, Uric Acid, Nitrite and Xanthine" *International Journal of Electrochemical Science*, 13(3): 2310-2328, (2018).

Numerical Analysis of Two Units PEM Fuel Cell Stack

Tugay ARIÇ¹, Muhittin BİLGİLİ^{2,*}, Abuzer Kadir ÖZSUNAR³

^{1,2,3} Gazi University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, 06570, Maltepe/ANKARA

Graphical/Tabular Abstract

Article Info:

Research article
 Received: 24/09/2019
 Revision: 19/11/2019
 Accepted: 27/11/2019

Highlights

- PEMFC stack modelling
- Electrical power curve
- CFD analysis of fuel cell

Keywords

PEM Fuel Cell
 Bipolar Plate
 Fuel Cell Stack

In this study, PEM fuel cell stack is analyzed by numerically. By using the same cell dimensions, electrochemical and physical properties at each layer of the cell, a PEM fuel cell stack is designed and prepared. Each cell has 5.4 cm² active area and connected in series. Reactants of anode and cathode flow direction is preferred parallel. PEM fuel cells are accepted as operating conditions of 70°C and 1 atm. Polarization curves and electrical power curves are obtained for different current densities values of single and stack of PEMFC.

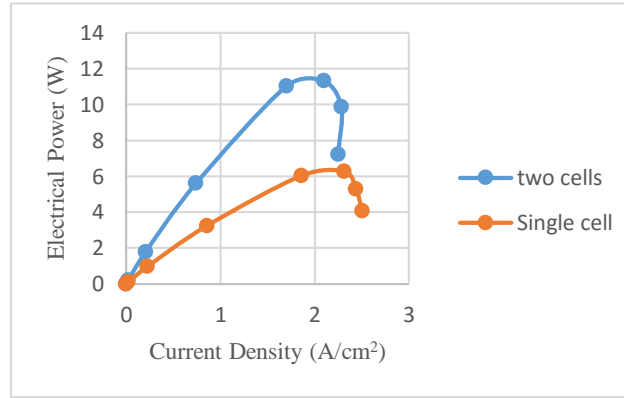


Figure A. Electrical power curves corresponding to current density for single and two cells

Purpose: In this study, single and two unit PEM fuel cell stack are analyzed numerically and electrical power values calculated. Thereby it is observed that number of fuel cell units effects on the electrical power. It is also obtained how effectively increasing electrical power for two different number of fuel cell unit.

Theory and Methods: In this study, PEMFC single cell and stack models has been designed by CATIA V5R21. These designed cell models were analyzed for single and stack cell using ANSYS FLUENT.

Results: The maximum electrical power values obtained from two cells stack and single cell were calculated as 11.32 W and 6.26 W, respectively. It is observed when the number of units in the PEMFC is increased, it is attained more electrical power nearly at the same range. Reasons of the losses in the electrical power are estimated as friction, ohmic losses or rising of fluid cover distance.

Conclusion: Design and analysis of one and two units PEMFC are investigated in this study. And it has been observed when the cell number is increased from one to two cells, electrical power is increased about the same amount. Moreover, the distribution of reactants in the channels, temperature distributions, current density distributions and water saturation at selected cross sectional area for a two units fuel cell stack is analyzed at the different voltage values.



İki Hücreli PEM Yakıt Pili Yığının Sayısal Analizi

Tugay ARIÇ¹, Muhittin BİLGİLİ^{2,*}, Abuzer Kadir ÖZSUNAR³

^{1,2,3} Gazi University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, 06570, Maltepe/ANKARA

Öz

İnsanoğlunun enerji ihtiyacının büyük bir kısmını karşılayan petrol, doğalgaz gibi fosil enerji kaynaklarının gün geçtikçe azalmakta ve enerji üretiminde kullanılan kaynakların çevreye verdiği zararın giderek artması bilim adamlarını alternatif enerji kaynaklarına yönlendirmektedir. Bu alternatif enerji kaynaklarından biri olan yakıt pili uygulaması dikkatleri üzerine çekmektedir. Bu çalışmada iki hücreli bir PEM yakıt pili yığının analizi sayısal olarak yapılmıştır. Çalışmada her biri 5.4 cm²'lik aktif alana sahip iki PEM yakıt hücresi seri olarak bağlanarak yığın haline getirilmiştir. Anot ve katot bölümlerindeki reaktantların akış yönü paralel olarak tercih edilmiştir. Analiz edilen PEM yakıt pilinin çalışma koşulları ise 70°C ve 1 atm olarak belirlenmiştir. Bu tasarlanan yığından elde edilen güç değerleri hesaplanarak çalışmada sunulmuştur. Tek hücreli yakıt pili ve iki hücreli yığından elde edilen elektriksel güç değerleri grafikler halinde gösterilmiştir.

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 24/09/2019
Düzeltilme: 19/11/2019
Kabul: 27/11/2019

Anahtar Kelimeler

PEM Yakıt Pili
Bipolar Plaka
Yakıt Pili Yığını

Keywords

PEM Fuel Cell
Bipolar Plate
Fuel Cell Stack

Numerical Analysis of Two Units PEM Fuel Cell Stack

Abstract

The fact that the industrial factor progresses to the point where the fossil energy sources such as petroleum natural gas, which constitute a large part of human's energy needs, move to the point of decreasing and exhausting day by day, and the increasing damage caused by the resources used for energy production leads the scientists to alternative energy sources. Fuel oil application, one of these alternative energy sources, draws attention. In this study, PEM fuel cell stack is analyzed by numerically. Two PEM fuel cells are turned into stack, each of which has 5.4 cm² active area, by connecting in series. Reactants of anode and cathode flow direction is preferred parallel. PEM fuel cells are accepted as operating conditions of 70°C and 1 atm. Power values of this designed stack is calculated and presented in the study. Electrical power values of one and two PEMFCs are presented in graphics.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Son yıllarda fosil enerji kaynaklarının yol açtığı problemler nedeniyle dünyada yenilenebilir enerji konusu üzerine gittikçe artan bir ilgi vardır. Yenilenebilir enerji kaynaklarından güneş, rüzgar gibi sürekliliği olmayan alternatif enerji kaynaklarının kullanımında enerjinin depolanması ihtiyacı hidrojen enerjisinin kullanımını gündeme getirmiştir.

Hidrojen enerjisi konusundaki araştırmaların en ağırlıklı kısmını yakıt pilleri oluşturmaktadır. Yakıt pilleri yüksek verim, yan ürün olarak su çıkarması ve sessiz çalışması gibi avantajlara sahiptir. Yakıt pilleri; güç santralleri, otomobiller, dizüstü bilgisayarlar, cep telefonları gibi farklı ölçekte güç gerektiren yerlerde kullanılabilir. Yakıt pilleri içerisinde düşük sıcaklıklarda çalışmaları ve yüksek verimleri sebebiyle en çok ilgiyi çekenlerden biri PEM yakıt pilleridir. PEM yakıt pillerinin yoğun kullanılmasının sebeplerinden bazıları ise yüksek enerji yoğunluğu ve yüksek çalışma süresine sahip olması, hızlı şarj edilebilirliği ve çevre dostu olmasıdır [1,15].

Çalışmanın konusu olan 2 hücreli yığın tasarımında hücre sayısını arttırarak elde edilecek gücü de arttırmaktır. Deneysel çalışmalardan görülmektedir ki hücre sayısı ile elde edilen güç de doğru oranda artmaktadır [2].

Bir yığın tasarımında verimliliği etkileyen birçok faktör vardır. Bunlardan başlıcaları reaktantların giriş debileri, sıcaklık basınç değerleri ve akış kanalı geometrisidir. Bu yüzden yakıt pili verimliliğini arttırmaya yönelik çoğu çalışma bu konular üzerinden ilerlemektedir. PEM yakıt pillerinde en önemli problemlerden biri akış kanal deseninin doğru tasarımıdır. Bu yüzden çoğu çalışma akış kanalı tasarımı üzerine yoğunlaşmaktadır. Bu tasarımlar yapılırken amaç basınç düşüşünü engelleyip uniform bir akış sağlayıp verimliliği arttırmaktır [3].

Bu doğrultuda bipolar plaka kesiti genellikle dikdörtgen olsa da, yarı çembersel, üçgen vb. biçimlerinde kesit alanına sahip çeşitli plakalar da çalışmalarda kullanılmıştır [4].

Bunların yanında deneysel olarak bakıldığında yakıt pili performansını etkileyen başka etmenler de ortaya çıkmaktadır.

Bipolar plakalar PEM yakıt pili performansında kritik bir etkiye sahiptirler. Bir gaz sızıntısı veya reaksiyon sırasında üretilen suyun kötü yönetimi yığının bozulmasına neden olmaktadır. Farklı çalışma koşullarında bipolar plaka akış kanalı geometrisini değiştirerek akış kanallarında en iyi hız ve reaktant dağılımı elde edilmelidir [5].

Yakıt pillerinde bipolar plakanın bir yüzeyi hücrenin anot tabakası iken diğer taraf katot katmanıdır. Her iki yüzey yakıt ve oksidant için akış kanallarına sahiptir. Bu kanallar sayesinde yakıt ve oksidant aktif alanda eşit olarak dağıtılmaya çalışılır. Bu homojen dağılım hücre performansını ve verimini artırır. Bipolar plakalar, oksijenin ve yakıtın aktif bölgelere dağılımını sağlamakla, ısının aktif alanlardan uzaklaştırılmasıyla, hücreden hücreye akımın iletilmesiyle ve reaktantların yakıt pili sistemindeki sızıntısının önlenmesinden sorumludur [6].

Bipolar plakanın yüzeyinde reaktant gazların yakıt pili içerisinde dağıtımını için gaz akış kanalları vardır. Kanal geometrisi, kullanılan kanal deseni anot ve katot tarafı için farklı olabilir. Ayrıca reaktantların yakıt pili sisteminde akış yönü isteğe göre eş veya zıt olabilir. Bipolar plaka gaz akış kanalı deseninin seçimi ve optimizasyonu, yakıt pilinin performansını büyük ölçüde etkiler. Temel geometri seçimine ek olarak, kanallar arasındaki kanal boyutları ve akış kanal deseni dikkatle düşünülmelidir. Aksi takdirde, rastgele seçimler beklenen hücre akımının ve performansı değerlerine ulaşmayı engeller [7].

Teorik açıdan bakıldığında yakıt pilinde gerçekleşen kimyasal reaksiyon sonucu elde edilen elektriksel potansiyel 1.23 V'tur. Ancak deneysel çalışmalarda bu değer 1 V'un altına düşebilmektedir. Eğer tek bir pilin 1 kW güç üretmesi bekleniyorsa bunu tek bir hücreyle elde etmek mümkün değildir. Bunun için çok sayıda hücreden oluşan bir yığın yakıt pili kullanılmalıdır. Hücre sayısı arttıkça yığın voltajı da doğru orantılı olarak artacağından yakıt pilinden sağlanacak güç de artacaktır [8].

Bu çalışmada iki hücreli bir yakıt pili tasarlayıp tek hücreli yakıt piline göre elde edilen elektriksel güç miktarları karşılaştırılmıştır. Ayrıca 2 hücreli yakıt pili için voltaj değerine karşılık gelen akım yoğunluğunu gösteren bir polarizasyon eğrisi elde edilmiştir. Bu çalışmayla yakıt pili hücre sayısının elde edilen elektriksel güce etkisinin incelenmiştir. Ayrıca hücre sayısı arttıkça meydana gelen kayıplarda yapılan analiz sonucunda irdelenmiştir.

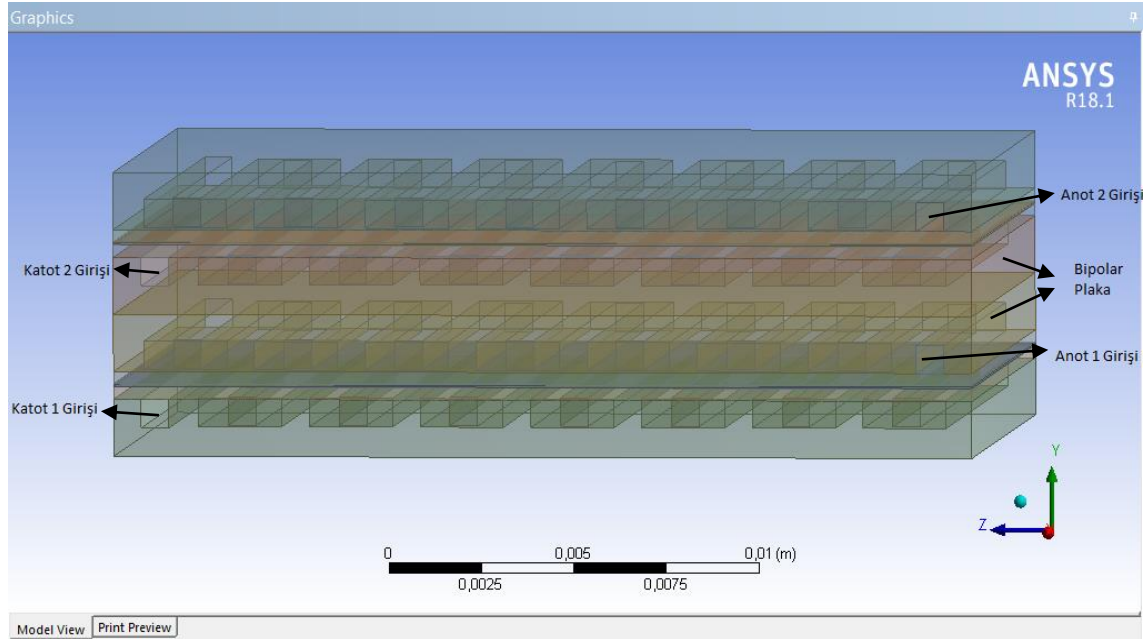
2. SAYISAL YÖNTEM (NUMERICAL METHOD)

2.1. Yakıt Pili Tasarımı (Design of Fuel Cell)

Bir yakıt pilinden elde edilecek elektriksel gücü arttırmanın çeşitli yolları vardır. Bunlardan biri yüzey aktif alanın miktarını arttırmaktır. Ancak bu yöntem çok kullanışsız ve verimsiz bir yöntem olacaktır. Bu yüzden elde edilen gücü arttırmak için kullanılabilir en akıllıca yöntem yakıt pilindeki hücre sayısını arttırmak olacaktır [8].

Hücre sayısını arttırmak elde edilecek elektriksel gücü arttıracaktır. Ancak artan hücre sayısı ile beraber yakıt pili performansında da düşüşler olacaktır ve elde edilen akım yoğunlukları arasında farklar olacaktır. Bu farkların en büyüğü ise tek hücreli ve iki hücreli yakıt pilleri arasındaki farktır. % 23,4 olan bu fark devam eden hücre artışlarında giderek azalmaktadır [9].

Bu çalışmada 2 hücreli bir PEM yakıt pili tasarımı yapılarak, tek hücreli yakıt piline göre elde edilen gücün artışı ANSYS FLUENT programı ile analiz edilmiştir. Buradan elde edilen verilerle hücre sayısındaki artışa bağlı olarak meydana gelebilecek kayıplar görülüp, 2 hücreli bir PEM yakıt pili için bir polarizasyon eğrisi elde edilmiştir. Analizde kullanılan tasarım ve ölçüleri Şekil 1 ve Tablo 1 olarak gösterilmiştir.



Şekil 1. İki hücreli PEM yakıt pili geometrisi

Tablo 1. PEM yakıt hücresinin geometrik ölçüleri

FİZİKSEL BOYUTLAR	1S SERPANTİN	BİRİM
Kanal derinliği	0.75	mm
Kanal genişliği	0.75	mm
Akış kanalı kesit alanı	0.5625e-06	m ²
Yakıt pili aktif alanı	0.00054	m ²
Difüzyon tabakası kalınlığı	0.325	mm
Katalizör tabakası kalınlığı	0.015	mm
Membran Kalınlığı	0.05	mm

Tasarlanan bu yakıt pilinin mesh işlemi, mesh kalitesinin yüksek ve analizin hassas olması amacıyla ICEM üzerinden yapılmıştır.

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

PEM yakıt pilindeki güç hesaplamaları temel olarak yakıt pili voltaj değerine ve akım yoğunluğu değerine bağlıdır. Bir yakıt pilinden elde edilebilecek güç basit olarak:

$$W = V_{yığın} \times I \quad 1$$

$V_{yığın}$ değeri yığının voltaj değeri olup, her bir hücredeki ortalama voltaj değerinin yakıt pilindeki hücre sayısı ile çarpılması sonucu elde edilir.

$$V_{yığın} = V_{hücre} \times N_{hücre} \quad 2$$

Akım (I) ise, elde edilen akım yoğunluğu (i) [A/cm^2] değerinin tasarımdaki yakıt pili aktif yüzey alanının çarpılması sonucu elde edilir. PEM yakıt pillerinde yakıt pili performansını dolayısıyla elde edilecek akım yoğunluğu ve güç değerlerini etkileyen en önemli faktörler reaktant debisi, çalışma basınç ve sıcaklık değerleri ve stokiyometri oranlarıdır. Çalışmada analizler $70^\circ C$ sıcaklık ve 1 atm basınç değerleri için gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma sıcaklık ve basınç değerleri için yakıt piline gönderilecek olan reaktant gazların kütle debileri aşağıdaki eşitlikler kullanılarak hesaplanmıştır.

$$U_{a,in} = \zeta_a \frac{I}{n_e F} A_{mea} \frac{1}{X_{H_2}} \frac{RT_{in}}{P_{in}} \frac{1}{A_{ch}} \quad 3$$

Eş.(3)'teki ζ reaktant gazların stokiyometri oranı, n_e reaktantların bir molünde bulunan elektron sayısını, A_{mea} aktif alan (m^2), A_{ch} kanal kesit alanı (m^2), X reaktant gazların mol oranı, I : Anot ve katot tarafları için referans akım yoğunlukları ($A \cdot m^{-2}$), F (Faraday sabiti)=96485 Coulombus/electron-mol, $R=8.314 kJ/kg \cdot K$, T_{in} giriş sıcaklığı $70^\circ C$ (343.343 K), $\zeta_a = 2.5$, $X_{H_2} = 0.794038$ ve anot akım referans yoğunluğu $I=10000 A/m^2$ olarak hesaba katılmıştır.

Buradan hacimsel debi ve nem oranları:

$$\dot{V}_{a,in} = U_{a,in} \cdot A_{ch,in} \quad 4$$

$$w_{an} = \frac{P_{H_2O} \cdot V / T \cdot R_{H_2O}}{V \cdot P_{H_2} / T \cdot R_{H_2}} = \frac{R_{H_2} \cdot P_{H_2O}}{R_{H_2O} \cdot P_{H_2}} = 8.936 \frac{P_{H_2O}}{P - P_{H_2O}} \quad 5$$

Bu hesaplamaların ardından kütle debisi:

$$\dot{m}_{an} = U_{a,in} / V_{an} \quad 6$$

Bu hesaplamalar anot tarafı için yapılmış ve aynı şekilde katot kısmı için tekrarlanmıştır. Yapılan bu hesaplamalar doğrultusunda anot tarafı için giriş debisi $1.988e-07$ kg/s ve katot tarafı için giriş kütle debisi ise $8.342e-06$ kg/s olarak bulunmuş ve analizler bu değerlere göre yapılmıştır.

Tablo 2. Reaktantların fiziksel özellikleri

Fiziksel Özellik	H ₂	O ₂	H ₂ O (su buharı)
Özgül Isı (J kg ⁻¹ K ⁻¹)	14283	919.31	2014
Isıl İletim Katsayısı (W m ⁻¹ K ⁻¹)	0.1672	0.0246	0.0261
Viskozite (kg m ⁻¹ s ⁻¹)	8.41×10^{-6}	1.91×10^{-5}	1.34×10^{-5}
Molekül Ağırlığı (kg kmol ⁻¹)	2.01594	31.9988	18.01534
Elektrik İletkenliği (Ohm m) ⁻¹	1×10^{-16}	1×10^{-16}	1×10^{-16}

Tablo 3. Sayısal analizde kullanılan elektrokimyasal parametreler

PARAMETRELER	DEĞER	BİRİM
Anot Referansı Akım Yoğunluğu	10000	A.m ⁻²
Anot Referansı Mol Derişimi	1	kmol.m ⁻³
Anot Derişiminin Değeri	0.5	-
Anot Aktarım Katsayısı	1	-
Katot Referansı Akım Yoğunluğu	20	A.m ⁻²
Katot Referansı Mol Derişimi	1	kmol.m ⁻³
Katot Derişiminin Değeri	1	-
Katot Aktarım Katsayısı	1	-
Açık Devre Voltajı	0.98	V
GDL Isıl İletkenliği	1.6	W(m.K) ⁻¹
Katalizör Tabakası Isıl İletkenliği	2	W(m.K) ⁻¹
Bipolar Plakanın Isıl İletkenliği	20	W(m.K) ⁻¹
GDL Elektriksel İletkenliği	2500	(ohm.m) ⁻¹
Katalizör Tabakası Elektriksel İletkenliği	2500	(ohm.m) ⁻¹
Bipolar Plaka Elektriksel İletkenliği	22000	(ohm.m) ⁻¹
GDL Gözenekliliği	0.75	-
Katalizör Tabakası Gözenekliliği	0.5	-
Temas Açısı Anot / Katot	165	°
Temas Direnci	5e-07	Ohm.m ²
Membran Eşdeğer Ağırlık	1100	kg.kmol ⁻¹

Bunlarla beraber ANSYS FLUENT ile sayısal analiz probleminin çözümünde kullanılan denklemler aşağıda verilmiştir. Modelde iki adet faz durumundan söz etmek mümkündür. Bunlar sıvı ve gaz fazlarıdır. Problem iki fazlı olarak çözülmüştür.

Kanallardaki ve gaz difüzyon katmanındaki süreklilik denklemi, kütle korunumundan:

$$\nabla(\rho\epsilon u) = S_m \quad 7$$

Şeklinde verilmiştir. Bu denklemde ϵ elektrottaki gözeneklilik katsayısı, ρ gaz karışımının yoğunluğu ve u akışkanın hız vektörüdür. S_m , PEM yakıt pilindeki reaktantların elektrokimyasal reaksiyon boyunca üretim ve tüketimlerini göstermektedir.

Momentumun korunumu denklemi,

$$\nabla \cdot (\epsilon\rho\mu u) = -\epsilon\nabla p + (\epsilon\mu_{eff}\nabla u) + S_u \quad 8$$

şeklinde dir. Bu denklemde p basınç ve μ viskoziteyi temsil etmektedir. S_u problemdeki gözenekli ortama bağlı kaynak terimidir.

Enerji denklemi ise,

$$\nabla \cdot (\lambda_{eff}\nabla T) = \nabla \cdot (\epsilon\rho C_p u T) + S_h \quad 9$$

şeklinde ifade edilir. Burada λ_{eff} efektif ısı iletkenlik, C_p izobarik ısı, S_h enerji kaynağı terimidir.

Gaz-sıvı karışımındaki her bir türün konveksiyon, difüzyon, reaksiyon tüketimi için korunum denklemi,

$$\frac{\partial(\epsilon C_k)}{\partial t} + \nabla(\epsilon\vec{u}C_k) = \nabla(D_k^{eff}\nabla C_k) + S_k \quad 10$$

şeklinde dir. Burada S_k volumetrik kaynak terimi ve D_k^{eff} efektif gaz difüzyon gücünü simgelemektedir.

Bu yakıt pilindeki yükün korunumu denklemi ise elektronlar için,

$$\nabla \cdot (\sigma_s^{eff}\nabla\Phi_s) = S_e \quad 11$$

protonlar için,

$$\nabla \cdot (\sigma_m^{eff} \nabla \Phi_m) = S_i \quad (12)$$

şeklindedir. Bu denklemde Φ_s katı faz potansiyelini, Φ_m membran potansiyelini, σ_s^{eff} efektif elektrik iletkenliğini ve σ_m^{eff} membranın iyonik iletkenliğini temsil etmektedir.

Butler-Volmer denklemi ise katalizör katmanındaki üretilip iletilen akımı çözmek için kullanılır ve aşağıdaki gibidir:

$$j_a = \zeta_{aj_a}^{ref} \left(\frac{[A]}{[A]} \right)^{\gamma_a} (e^{a_a F \eta_a / RT} - e^{-a_a F \eta_a / RT}) \quad (13)$$

$$j_c = \zeta_{cj_c}^{ref} \left(\frac{[C]}{[C]} \right)^{\gamma_c} (e^{a_c F \eta_c / RT} - e^{-a_c F \eta_c / RT}) \quad (14)$$

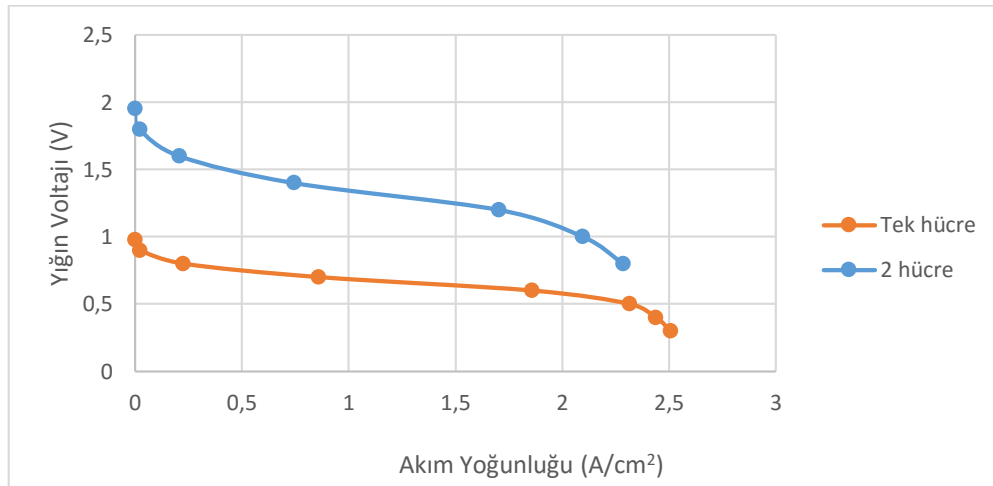
Herbir tabaka için çözülen denklemler ve kaynak terimleri Tablo 4’de verilmiştir. Burada yer kısıtlamasından dolayı bütün denklemler verilememiştir. Denklemlerin detaylı hali [11]’den görülebilir.

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Yakıt pillerinde bipolar plakanın bir yüzeyi hücrenin anot tabakası iken diğer taraf katot katmanıdır. Her iki yüzey yakıt ve oksidant için akış kanallarına sahiptir. Bu kanallar sayesinde yakıt ve oksidant aktif alanda eşit olarak dağıtılmaya çalışılır. Bu homojen dağılım hücre performansını ve verimini artırır. Bipolar plakalar, oksijenin ve yakıtın aktif bölgelere dağılımını sağlamakla, ısının aktif alanlardan uzaklaştırılmasıyla, hücreden hücreye akımın iletilmesiyle ve reaktantların yakıt pili sistemindeki sızıntısının önlenmesinden sorumludur [10].

Bipolar plakanın yüzeyinde reaktant gazların yakıt pili içerisinde dağıtımı için gaz akış kanalları vardır. Kanal geometrisi, kullanılan kanal deseni anot ve katot tarafı için farklı olabilir. Ayrıca reaktantların yakıt pili sisteminde akış yönü isteğe göre eş veya zıt olabilir. Bipolar plaka gaz akış kanalı deseninin seçimi ve optimizasyonu, yakıt pilinin performansını büyük ölçüde etkiler. Temel geometri seçimine ek olarak, kanallar arasındaki kanal boyutları ve akış kanal deseni dikkatle düşünülmelidir. Aksi takdirde, rastgele seçimler beklenen hücre akımının ve performansının istenen değerlere ulaşmasını engeller [7].

Yapılan çalışmada tek hücreli ve iki hücreli aynı kütle debisi ve çalışma parametrelerine sahip iki adet PEM yakıt pili analizi ANSYS FLUENT üzerinden gerçekleştirilmiştir. Analiz sonucuna göre tek hücre ve iki hücreli yakıt pili yığını için elde edilen akım yoğunluğu değerleri kullanılarak polarizasyon eğrileri çizilmiştir (Şekil 2).



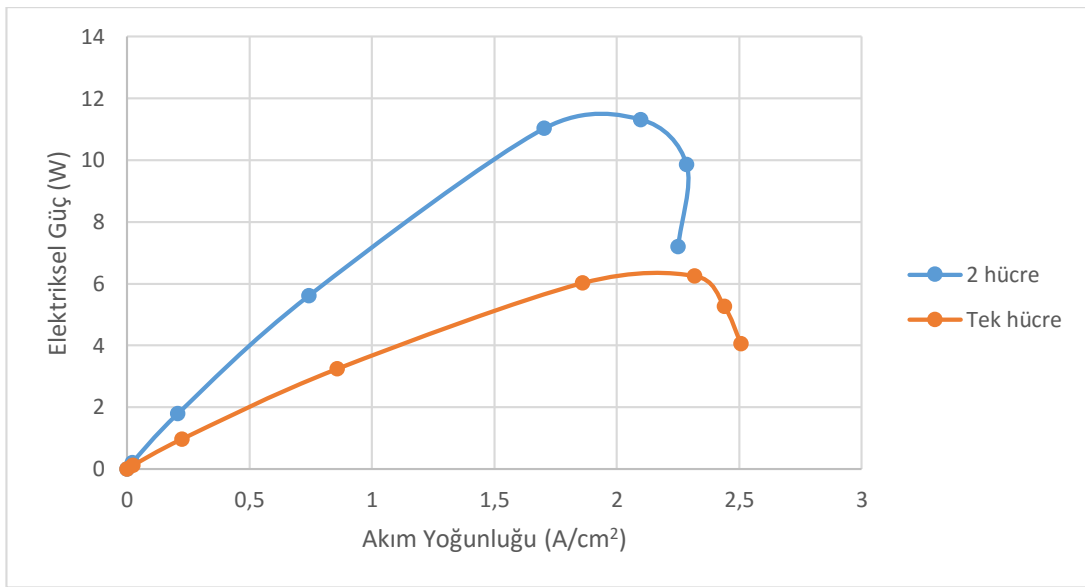
Şekil 2. Tek Hücreli ve İki Hücreli Yakıt Pilleri İçin Polarizasyon Eğrileri

Tablo 4. PEM Yakıt hücresi tabakalarında çözülen eşitlikler ve kaynak terimleri

Nicelik	Korunum Eşitlikleri	Kaynak Terimleri				
		Akım Toplama Plakası	Gaz Kanalları	Gaz Difüzyon Tabaka	Katalizör	Membran
Kütle	$\nabla(\rho\vec{u}) = S_m$	$S_m = 0$	$S_m = 0$	$S_m = 0$	$S_m = 0$	$S_m = 0$
Momentum	$\frac{1}{\varepsilon^2} \nabla(\rho\vec{u}\vec{u}) = -\nabla p + \nabla\tau + S_u$	$S_u = 0$	$S_u = 0$	$S_u = -\frac{\mu}{K} \varepsilon^2 \vec{u}$	$S_u = -\frac{\mu}{K} \varepsilon^2 \vec{u}$	$S_u = -\frac{\mu}{K} \varepsilon^2$
Tür	$\nabla(\vec{u}C_k) = \nabla(D_k^{eff} \nabla C_k) + S_k$	$S_k = 0$	$S_k = 0$	$S_k = 0$	$S_k = -\frac{M_{w,k}}{nF} R_{an}, \quad k = H_2$ $S_k = -\frac{M_{w,k}}{nF} R_{cat}, \quad k = O_2, H_2O$	$S_k = 0$
Katı Faz Potansiyeli	$\nabla \cdot (\sigma_{sol} \nabla \phi_{sol}) + S_{\phi,sol} = 0$	$S_{\phi,sol} = 0$	$S_{\phi,sol} = 0$	$S_{\phi,sol} = 0$	$S_{\phi,sol} = -R_{an}, \quad S_{\phi,sol} = R_{cat}$	$S_{\phi,sol} = 0$
Membran Potansiyeli	$\nabla \cdot (\sigma_{mem} \nabla \phi_{mem}) + S_{\phi,mem} = 0$	$S_{\phi,mem} = 0$	$S_{\phi,mem} = 0$	$S_{\phi,mem} = 0$	$S_{\phi,mem} = R_{an}, \quad S_{\phi,mem} = -R_{cat}$	$S_{\phi,mem} = 0$
Enerji	$\nabla(\vec{u}\rho h) = \nabla(k^{eff} \nabla T) + S_h$	$S_h = 0$	$S_h = 0$	$S_h = 0$	$S_h = I^2 R_{ohm} + h_{reaction} + \eta R_{an,cat} + h_{phase}$	$S_h = 0$

Şekil 2'den görüldüğü üzere polarizasyon eğrileri benzerlik göstermektedir. İki yakıt pilinde de azalan voltaj değerine karşılık gelen akım yoğunluğu değeri artmıştır. Bu büyük artışlar ise iki hücreli yakıt hücresi için 1 V ve tek hücreli yakıt pili için 0.5V'a kadar devam etmiş bu değerlerden sonraki akım yoğunluğundaki artışlar düşmüştür. İki hücreli yakıt pilinde ortalama voltaj değeri 2 katına çıkmış ve elde edilen akım yoğunluğu neredeyse aynı kalmıştır. Ancak iki hücreli yakıt pilinde tek hücreli yakıt piline göre elde edilen akım yoğunluğunda kısmi düşüşler olduğu görülmektedir. Bunun nedeni hücre sayısına bağlı olarak oluşan kayıplardır. Hücre sayısına bağlı olarak kayıplar farklı haller alabilir. Bu kayıplar yığın bağlantısındaki aksaklıklar, sürtünmeden kaynaklı basınç düşüşünün reaktantların ilerlediği geçişler fazla olduğu için artması gibi sebeplerden meydana gelebilir.

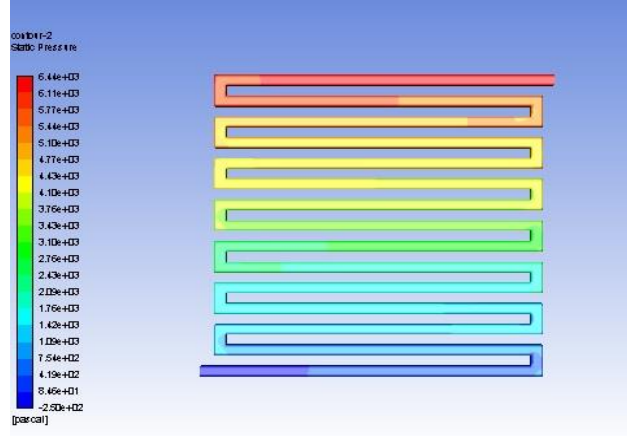
Elde edilen bu akım yoğunluğu değerlerinden yola çıkarak Eş.(1) ve Eş.(2) kullanılarak iki PEM yakıt pili içinde üretilen elektriksel güç değerleri sayısal olarak hesaplanmıştır. Bu durumda elektriksel güçler Şekil 3.'te gösterilmiştir.



Şekil 3. Tek Hücreli ve İki Hücreli PEM Yakıt Pilleri İçin Elde Edilen Güç Değerleri

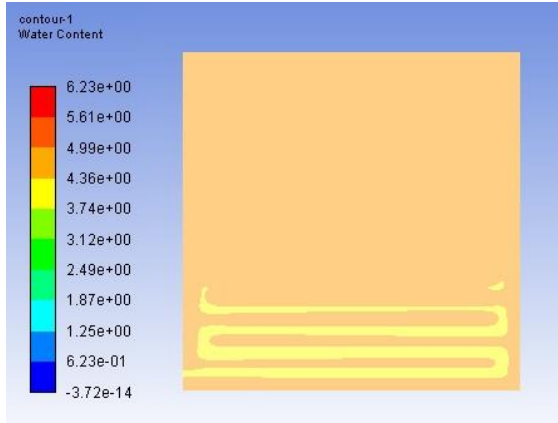
PEM yakıt pilindeki hücre sayısındaki artışa bağlı olarak üretilen elektriksel güç miktarı da arttığı Şekil 3'ten görülmektedir. Elektriksel gücün maksimum olmasının ardında gerçekleşen düşüşün tek hücreli yakıt pilinde daha küçük boyutlardayken iki hücreli yakıt pilinde ani bir düşüş gerçekleşmiştir. Hücre sayısı ve bundan kaynaklı voltaj miktarının 2 katına çıkmasına rağmen güç miktarındaki artış bu miktarla doğru orantılı ilerlememektedir. Burada yaklaşık 2 A/cm² değerini göz önüne alacak olursak, yakıt pillerinden elde edilen elektriksel gücün bu değere kadar arttığı ve 2 A/cm² den sonra düşüşe geçtiği gözlemlenmektedir. İki hücreli ve tek hücreli yakıt pillerinden elde edilen maksimum elektriksel güç değerleri 11.32 W ve 6.26 W olarak hesaplanmıştır. Bunun nedeni elde edilen akım yoğunluğundaki düşüştür. Bu da yine hücre sayısına bağlı kayıplardan dolayı ortaya çıkmaktadır. Artan hücre sayısına göre kayıpların artmasının önüne geçebilmek adına kanal tasarımında değişiklikler yaparak basınç kaybı en aza düşürülebilir, çalışma parametreleri en verimli değerlere getirilebilir, yığın montajları gözden geçirilebilir ve böylece kayıp miktarı azalarak verimlilik artırılabilir.

Aşağıda verilen basınç dağılımı, H₂O dağılımı, sıcaklık ve akım yoğunluğu dağılımına ait şekillerde iki hücre için de elde edilen değerler benzerlik gösterdiği için şekillerde sadece ilk hücrenin dağılımları kullanılmıştır. İki hücreli PEM yakıt pilinin analizi sırasında katot kanalındaki reaktantın basınç değişimi Şekil 4.'te gösterilmiştir.

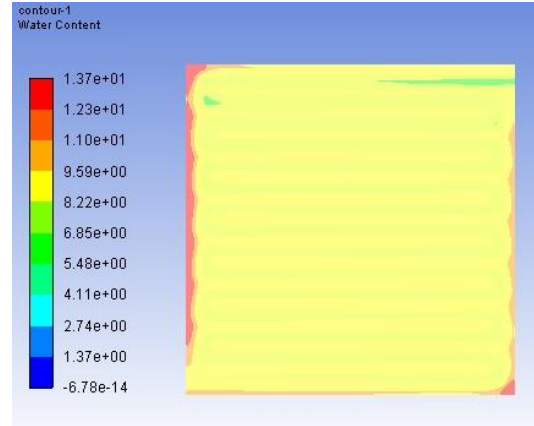


Şekil 4. Katot kanalı basınç değişimi

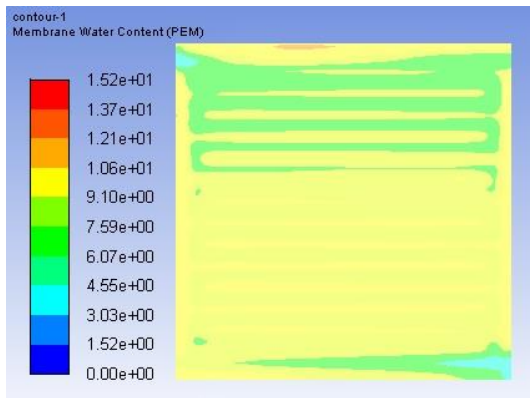
Şekil 4.'te görüldüğü üzere $6.44e+03$ Pa basınçla katot kanalına giren akışkan, kanal geometrisi ve sürtünme gibi etkenler yüzünden kademeli olarak azalarak katot kanalı çıkışında $8.46e+01$ Pa basınca kadar düşmüştür. Anot kanalında ise yaklaşık olarak 300 Pa değerinde bir basınç düşüşü gözlemlenmiştir. Katot girişine göre anot kanalı debisinin oldukça düşük olması nedeniyle giriş basıncı çok daha düşüktür. Bundan kaynaklı olarak kanal çıkışına kadar gerçekleşen basınç düşüşü de oldukça düşük olmuştur. Yakıt pili çalışmalarında akışın üniform bir şekilde devam etmesi performans açısından oldukça önemlidir. Akışı daha üniform hale getirebilmek için debilerle ve özellikle kanal geometrisi değiştirilebilir.



Şekil 5(a). 1.6V'da membrandaki H_2O dağılımı



Şekil 5(b). 1.2V'da membrandaki H_2O

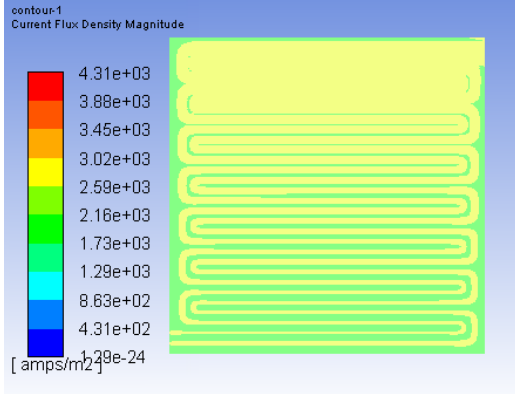


Şekil 5(c). 0.8V'da membranda H_2O dağılımı

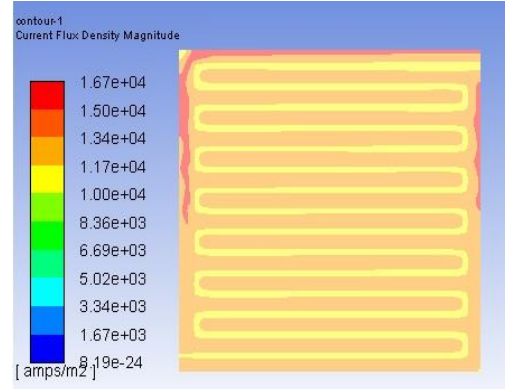
Hücredeki su içeriğinin homojen dağılımının yakıt pili dayanıklılığını olumlu yönde etkilediği bilinmektedir. Katot tarafındaki su taşkını problemi, akış kanalı tasarımı ile üstesinden gelmeye çalışılan ana problemlerden biridir [12].

Su buharı ve sıvı suyun 25°C' ki doymunluğu, sayısal analiz sonuçlarından elde edilen membran su içeriği değeri, eğer 14'e eşit ise birbiriyle denge halindedir. Bu değer 14'ü aşarsa su taşkınına neden olabilir. Yakıt pilinin su taşkınına maruz kalmasını önlemek için su içeriği değerini 14'ün altında tutulması önerilir [13].

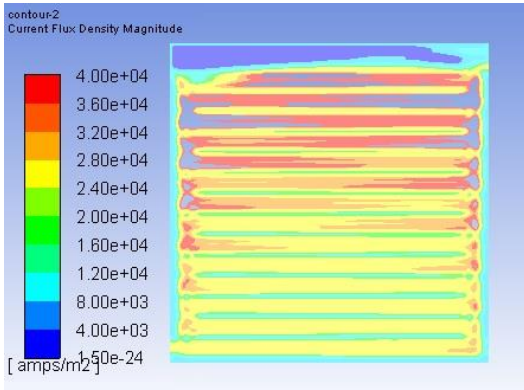
Şekil 5.(a), (b) ve (c)'ye bakıldığında en homojen dağılımların yüksek voltaj değerlerinde sağlandığı görülmektedir. 0.8V değerinde homojen olmayan bir dağılım gözlemlenmektedir. Bu durum membran yüzeyinde kuru bölgeler olduğunu gösterir ve bu da yakıt pili performansını olumsuz yönde etkiler. Yine şekillerden yola çıkarak voltaj artımına bağlı olarak su dağılımının da ideal değer olan 14 değerine yaklaştığını söylemek mümkündür. Ancak Şekil 5.(a) ve (b)'ye bakarak bu artışın belirli bir voltaj değerinden sonra tekrar düşüp homojenliğin dağılacağı söylenebilir. Ancak yukarıdaki üç voltaj değeri için de herhangi bir su taşkını gerçekleşmemiştir.



Şekil 6(a). 1.6V için akım yoğunluğu dağılımı



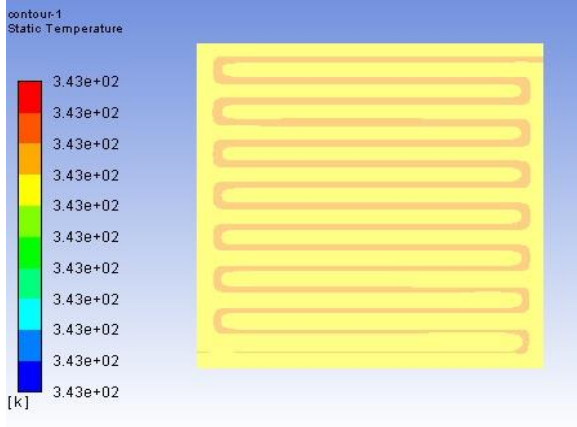
Şekil 6(b). 1.2V için akım yoğunluğu dağılımı



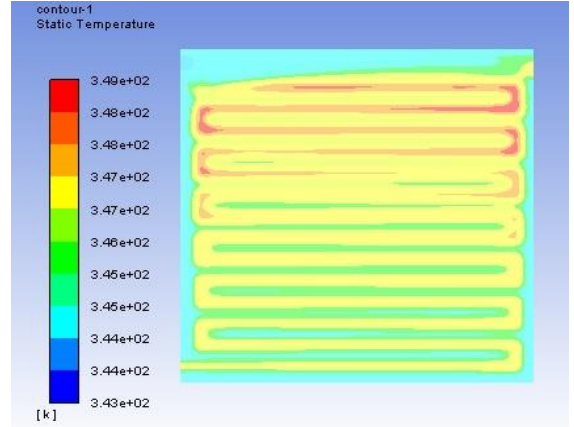
Şekil 6(c). 0.8V için akım yoğunluğu dağılımı

Akım yoğunluğunda da su dağılımında olduğu gibi voltaj değerinin azalmasıyla homojenlik de azalmıştır ve düzensiz bir dağılım gözlenmektedir. Yine yukarıdaki sonuçlara bakılarak voltaj değerinin düşmesiyle birlikte akım yoğunluğunda bir artışın olduğu söylenebilir. 1.6V ve 0.8V değerlerinde kanallarda akım yoğunluğu fazla olurken akış olmayan kollektörün gaz difüzyon katmanıyla temas eden bölgelerinde akım yoğunluğunun düşük olduğu gözlenmiştir. Ancak 1.2V değerinde ise bu durum tam tersine dönmüştür ve en homojen dağılım bu voltaj değerinde elde edilmiştir.

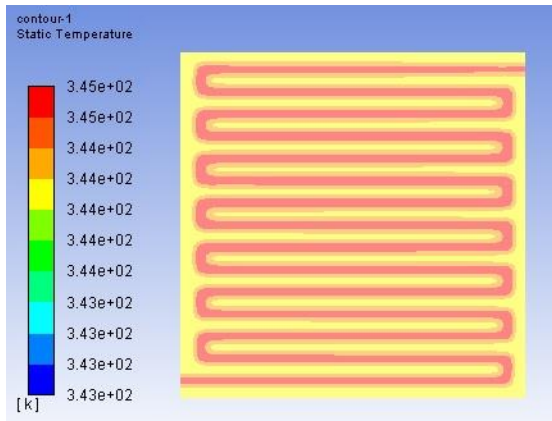
Yakıt pilinin performansını iyileştirmek için çalışma sıcaklığı belli bir seviyeye kadar yükseltilebilir. Yakıt pillerindeki sıcaklığın artırılması ile katalizör aktivitesi, elektrokimyasal reaksiyon hızı ve yakıt pilinin membran protonik direnci azalır, böylelikle yakıt pili performansı artar [14]. PEM yakıt pilinde sıcaklık dağılımı hücre boyunca aynı olmayabilir. İçeriden dışarıya, girişten çıkışa değişebilir. Bu homojen olmayan sıcaklık dağılımı da yakıt pili performansını düşürebilir [8].



Şekil 7(a). 1.6V için membran sıcaklık dağılımı



Şekil 7(b). 0.8V için membran sıcaklık dağılımı



Şekil 7(c). 1.2V için membran sıcaklık dağılımı

Şekil 7.(a), (b) ve (c)'ye bakıldığında yakıt pilinde çalışma sıcaklığına göre bir sıcaklık artışı hemen hemen hiç olmamaktadır. Ancak sıcaklığın fazla arttığı ve yakıt pili performansını kötü etkileyeceği düşünülen durumlarda yakıt piline soğutma kanalları eklenmelidir. Sonuçlara bakılarak en büyük sıcaklık artışının en küçük voltaj değerinde olup yüksek voltaj değerlerinde sıcaklık değişiminin yok denecek kadar az olduğu (1-2°C), en homojen sıcaklık dağılımının en yüksek voltaj değerinde ve en düzensiz dağılımın ise en düşük voltaj değerinde olduğu söylenebilir. Akım kanallarındaki düzensiz sıcaklık dağılımları bölgesel reaksiyonlara ve yakıt pili performansında düşüşlere neden olabilir.

4. DEĞERLENDİRME (CONCLUSION)

Bu çalışmada PEM yakıt pillerinden elde edilen gücün hücre sayısına göre değişimi gözlenmiştir. Bunun için tek hücreli ve iki hücreli iki adet PEM yakıt pilinin ANSYS FLUENT ile analizi yapılmıştır. Hücre sayısıyla birlikte elde edilen gücün arttığı ancak hücre sayısıyla beraber kayıpların da artmasından dolayı bu artışın doğru orantılı olmayacağı görülmüştür. Bu kayıplara akışkanın kat ettiği mesafenin artması nedeniyle sürtünme, ısı artışı, kanal geometrisinin homojen bir akışa elverişli olmaması veya hücrelerin doğru bir şekilde montaj edilememesi gibi birçok sebepten kaynaklanabilir.

Ayrıca yine bu çalışmada iki hücreli yakıt pili için reaktantların kanallardaki dağılımlarının homojenliği, sıcaklık dağılımı, akım yoğunluğu dağılımı ve suya doygunlukları gibi etmenler, çeşitli voltaj değerleri için analiz edilmiş ve voltaj değerlerine göre bu durumların ne gibi değişikliklere yol açtığı gözlenerek en verimli olan voltaj değerleri belirlenmeye çalışılmıştır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Dyer, C.K. (2002). Fuel cells for portable applications. *Journal of Power Sources*, 106, 31-40.
- [2] Youssef M.E., Amin R.S., El-Khatib K.M. (2018). Development and performance analysis of PEMFC stack based on bipolar plates fabricated employing different designs. *Arabian Journal of Chemistry*, 11, 609–614.
- [3] Xianguo Li, Imran Sabir (2005). Review of bipolar plates in PEM fuel cells: Flow-field designs. *Journal of Hydrogen Energy*, 30(4), 359-371.
- [4] Hontanon E., Escudero M.J., Bautista C., García-Ybarra P.L., Daza L. (2000). Optimisation of flow field in PEM fuel cell using CFD techniques. *Journal of Power Sources*, 86(1), 363–368.
- [5] Sala, P., Stampino, P.G., and Dotelli G. (2014). Design approach for the development of the flow field of bipolar plates for a PEMFC stack prototype. *Journal of Fuel Cell Science and Technology*, 11, 1-7.
- [6] Wu, H. (2009). Mathematical modeling of transient transport phenomena in PEM Fuel Cells. Doktora Tezi, University of Waterloo, Canada, 3-6.
- [7] Hoogers, G. (2003). *Fuel Cell Technology Handbook*. Boca Raton: CRC Press.
- [8] Barbir, F. (2005). Introduction. *PEM Fuel Cells Theory and Practice*, London: Elsevier Academic Press, 207-243.
- [9] Lim B.H., Majlan E.H., Daud W.R.W., Rosli M.I., Husaini T., (2019). Three-dimensional study of stack on the performance of the proton exchange membrane fuel cell. *Energy*, 169, 338-343.
- [10] Wu, H. (2009). Mathematical Modeling of Transient Transport Phenomena in PEM Fuel Cells. Doktora Tezi, University of Waterloo, Canada, 3-6.
- [11] Bilgili M., Bosomoui M., Tsotridis G. (2015). Gas flow field with obstacle for PEM fuel cells at different operating conditions. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(5), 2303-2311.
- [12] Chen, L., Cao, T., Li, Z., He, Y., and Tao, W. (2012). Numerical investigation of liquid water distribution in the cathode side of proton exchange membrane fuel cell and its effects on cell performance. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37, 9155–9170.
- [13] Limjeearajarus, N., & Charoen-amornkitt, P. (2015). Effect of different flow field designs and number of channels on performance of a small PEFC. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40, 7144-7158.
- [14] Zhang, J. (2008). *PEM Fuel Cell Electrocatalyst and Catalyst Layers, Fundamentals and Applications*, Canada: Springer, 1 -50.
- [15] Demirtaş M., Akkoyun N., Akkoyun E., Çetinbaş İ, (2019). Akıllı Şebekelerde Güneş Enerjisi Üretiminin Zamana Bağlı Olasılıksal Tahmini. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 7 (2), 411–424.

A New Core Geometry for Wireless Power Transfer Based on Magnetic Resonance

 Zafer DOĞAN^{1,*}, Mustafa ÖZSOY², İres İSKENDER³
^{1,2} Tokat Gaziosmanpaşa University, Department of Electrical-Electronics Engineering, 60150, Merkez/TOKAT

³ Çankaya University, Department of Electrical-Electronics Engineering, 06790, Etimesgut/ANKARA

Graphical/Tabular Abstract

Article Info:

Research article

Received: 29/07/2019

Revision 22/11/2019

Accepted: 30/11/2019

Highlights

- WPT System based on Magnetic Resonance
- Series-Series Topology
- Circular-Sliced Segmented Ferrite Core

Keywords

 Wireless Power Transfer
 Magnetic resonance
 Core

The most important goal in Wireless Power Transfer (WPT) applications is to provide efficient energy transfer. In this study, a WPT system based on magnetic resonance is designed. In the proposed design, the system efficiency was calculated over the wireless power transfer system with serial-series topology based on magnetic resonance.

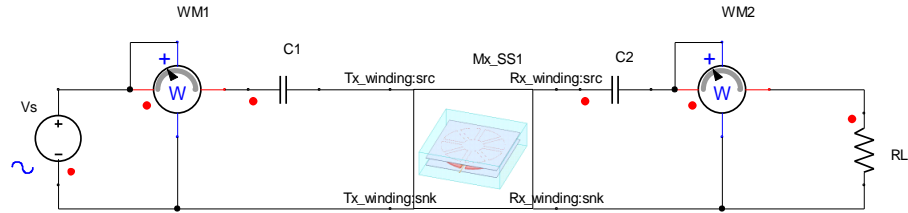


Figure A. Designed WPT system

Purpose: In this study, it is aimed to design a 50 mm air gap magnetic resonance based high efficiency WPT system which can be used in power transfer applications such as mobile phone charging, electric vehicle charging etc.

Theory and Methods: Firstly WPT transformer design was made by using split core structure. In this study, analytical calculations for transformer design are given. Finite element method (FEM) analysis of the designed transformer was performed with ANSYS Maxwell. Then, a high efficient serial-series system topology was determined. Circuit design of WPT system determined in Simplorer was performed.

Results: According to the FEM analysis results, no magnetic saturation was observed in the transformer. The inductances of the transmitter and receiver coils obtained in the magnetic analysis results are 298.5245598 μ H and 298.5192085 μ H respectively and these values are compatible with the analytic calculations. In the WPT system, 1.92 kW of power is transmitted from the transmitter side to 1.88 kW on the load on the receiving side.

Conclusion: In this study, in order to determine the maximum efficiency of the transformer with 50 mm air gap in the WPT system, power transmission was performed on a fixed ohmic (R_L) load by transformer feeding from 10 kHz frequency sinusoidal source with 97 % efficiency. This value was found to be an important result when compared with the studies in the literature. These results showed that the proposed circular-sliced segmented core structure can be used successfully in WPT transformer applications.

GU J Sci, Part C, 7(4): 1012-1024 (2019)

Gazi Üniversitesi

Fen Bilimleri Dergisi

PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

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

Manyetik Rezonansa Dayalı Kablosuz Güç Transferi İçin Yeni Bir Nüve Geometrisi

Zafer DOĞAN^{1,*}, Mustafa ÖZSOY², İres İSKENDER³^{1,2}Tokat Gaziosmanpaşa University, Department of Electrical-Electronics Engineering, 60150, Merkez/TOKAT³Çankaya University, Department of Electrical-Electronics Engineering, 06790, Etimesgut/ANKARA

Öz

Kablosuz Güç Transferi (KGT) uygulamalarında en önemli hedef, verimli bir enerji transferi sağlamaktır. KGT günümüzde cep telefonu şarjı, elektrikli araç şarjı, aydınlatma, kontrol vb. birçok alanda uygulanmaktadır. Yüksek verimi, çevresel olumsuz etkilerinin az olması gibi avantajlarından dolayı, manyetik rezonans yöntemi kısa hava aralıklı mesafelerde KGT için en çok tercih edilen yöntemdir. Manyetik rezonansa dayalı KGT sistemlerinde, sistem verimini artırmak için yüksek verimli bir KGT transformatörü kullanılmalıdır. Bu çalışmada manyetik rezonansa dayalı bir KGT sisteminin tasarımı yapılmıştır. Bu amaçla öncelikle hibrit (hava-ferrit) nüveli özgün bir transformatör tasarlanmıştır. Transformatörün Dairesel-Dilimli Parçalı(D-DP) ferrit nüve yapısı ilk defa bu çalışmada kullanılmıştır. Transformatörün sargıları litz iletken olarak tasarlanmıştır. Transformatörde kaçak akıları en aza indirmek amacıyla sargıların dış yüzeylerine alüminyum levhalar kullanılarak manyetik akı sargılar arasında kalmaya zorlanmıştır. Tasarlanan transformatörün sonlu elemanlar yöntemi ile manyetik analizleri yapılmış ve sonuçları nümerik hesaplarla doğrulanmıştır. Manyetik analiz sonuçları kullanılarak, KGT transformatörü benzetim devresi üzerinden yüklenmiş ve 5 cm'lik bir hava aralığında % 97 verim ile güç transferi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar D-DP ferrit nüve yapısının KGT transformatörü uygulamalarında başarı ile kullanılabileceğini göstermiştir.

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 29/07/2019
Düzeltilme: 22/11/2019
Kabul: 30/11/2019

Anahtar Kelimeler

Kablosuz Güç Transferi
Manyetik Rezonans
Nüve

Keywords

Wireless Power Transfer
Magnetic resonance
Core

A New Core Geometry for Wireless Power Transfer Based on Magnetic Resonance

Abstract

The most important goal in Wireless Power Transfer (WPT) applications is to provide efficient energy transfer. WPT is applicable at mobile phone charging, electric vehicle charging, lighting, control etc. Due to its high efficiency and low environmental impact, magnetic resonance is the most preferred method for short-range distances. In WPT systems based on magnetic resonance, a high efficiency WPT transformer should be used to increase system efficiency. In this study, a WPT system based on magnetic resonance is designed. For this purpose, firstly, a transformer with air-ferrite hybrid core is designed. The transformer's circular-sliced segmented (C-SS) ferrite core structure was used for the first time in this study. The transformer windings are designed as litz conductors. In order to minimize leakage fluxes in the transformer, the magnetic field was forced to stay between the windings by using aluminum plates on the outer surfaces of the windings. Magnetic analysis of the designed transformer was made with finite element method and the results were confirmed by numerical calculations. Using the magnetic analysis results, the WPT transformer was loaded over the simulation circuit and power transfer was achieved in a 5 cm air gap with 97% efficiency. The results showed that C-SS ferrite core structure can be used successfully in WPT transformer applications.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Elektrik enerjisinin günlük hayatta farklı amaçlarla kullanımı, beraberinde Kablosuz Güç Transferi (KGT) ihtiyacını ortaya çıkarmıştır. KGT, günümüzde artan elektrikli cihaz sayısının getirdiği kablo karmaşası gibi dezavantajları ortadan kaldırmakla birlikte, özellikle son yıllarda popüler hale gelen cep telefonu şarjı ve elektrikli araç şarjı gibi konularda da kendisine uygulama alanları bulmaktadır [1, 2]. 19.yy 'da temelleri Nikola Tesla tarafından atılan KGT fikri bu çalışmaların temelini teşkil etmektedir [3, 4, 5]. KGT ışınımsal ve ışınımsal olmayan yöntemlerle yapılmaktadır. Işınımsal olmayan yöntemlerden manyetik rezonans

(MR) yöntemi; insan sağlığına zarar vermemesi ve yüksek verimliliği yönüyle araştırmacılar arasında oldukça ilgi görmektedir. Kurs ve arkadaşları 2007 yılında MR kuplaj yöntemini kullanarak 2 m mesafedeki 60 W gücündeki bir lambayı % 40 civarında bir verimle enerjilendirmişlerdir [6]. İlk başlarda daha çok düşük güç seviyelerinde KGT uygulamaları yapılmaktayken, özellikle son 10 yılda, farklı aktarım mesafelerinde 7-10 kW güç seviyelerine ulaşabilen, % 80-95 arasında verim değerlerine sahip uygulamalar yapıldığı görülmüştür [7].

MR kuplajlı KGT sistemleri; besleme devresi, transformatör devresi ve yük devresinden oluşmaktadır. Transformatör devresi; alıcı-verici bobinler ve nüve yapısını içermektedir. Bu sistemde maksimum enerji transferini sağlamak için, bobinlerin rezonansı, manyetik devre (nüve) ve verici bobinin besleme frekansı önemli bir rol oynamaktadır.

MR kuplajlı KGT sistemlerinin rezonans durumunda çalışması verim açısından önemlidir [6, 8,9]. Rezonans, KGT sistemlerinde kaynak ile yük arasındaki güç aktarımını oransal olarak artırır ve böylece sistem verimini yükseltmektedir. Bununla beraber MR'nin gerçekleştirilmesinde; alıcı ve verici bobinlerin hizalanmış olması, eğer hizalanma yapılamıyorsa rezonans kondansatörlerinin değerlerinin yeni duruma göre güncellenmesi gereklidir [10]. KGT sistemlerinde verici tarafın şebeke frekansına göre oldukça yüksek frekanslı bir kaynak ile beslenmesi sistem verimi artıran diğer bir faktördür [11]. Bu sebeple aktarımı yapan bobinlerin tasarımında ve beslenmesinde bu durum göz önünde bulundurulmalıdır [12].

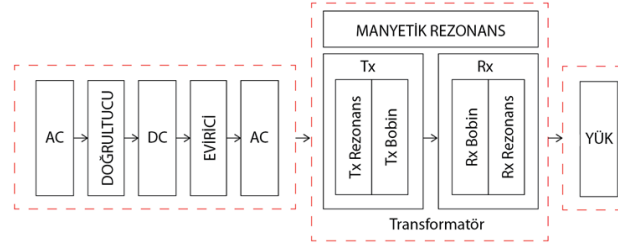
KGT sistemlerinde verimi etkileyen en önemli noktalardan diğer biri de düşük kayıp kuplajlı transformatör kullanılmaktır. Bir transformatörde elektrik enerjisi transferi birincil ve ikincil bobinler arasında manyetik enerji kuplajıyla gerçekleşmektedir. Verimli bir transfer için bu bobinler arasında maksimum manyetik akı geçişi sağlanmalıdır. Hava nüveli transformatörlü KGT sistemlerinde manyetik devre tamamen hava üzerinden tamamlanır. Bu yapı uzun mesafelere enerji aktarımında tercih edilir. Kısa mesafeli enerji aktarımlarında ise hibrit yapılar (hava- manyetik nüve) tercih edilir [13]. Manyetik nüve kullanımı, özellikle yüksek frekanslarda çalışan transformatörlerde beraberinde yüksek nüve kayıplarını da ortaya çıkarmaktadır. Bu durum yüksek frekanslarda çalışan KGT sistemlerinde verimi olumsuz yönde etkileyen önemli bir sorundur. Bu sistemlerde nüve kayıplarını minimize etmek için nüve geometrilerinde değişiklikler yapılmaktadır [5, 14]. Yapılan çalışmalarda parçalı manyetik nüve yapıları kullanımı [15], bobin geometrisini dikkate alan manyetik nüve yapıları ve akı yönlendirmeli manyetik nüve yapıları farklı araştırmacılar tarafından çalışılmıştır [16].

Bu çalışmada cep telefonu şarjı, elektrikli araç şarjı vb. güç transferi uygulamalarında kullanılacak, 5 cm hava aralıklı MR'ye dayalı yüksek verimli bir KGT sisteminin tasarımı amaçlanmıştır. Bu amaçla nüve kayıplarını en aza indirecek Dairesel-Dilimli Parçalı (D-DP) nüve yapılı özgün bir KGT transformatörü tasarlanmıştır. D-DP ferrit nüve yapısı literatürde ilk defa bu çalışmada kullanılmıştır. Tasarlanan transformatörün öncelikle sonu elemanlar yöntemi (SEY) kullanılarak manyetik analizleri yapılmış, daha sonra ANSYS Simplerer modülünde benzetime sokulmuş ve sistem verimi hesaplanmıştır.

Bu çalışma 6 bölümden oluşmaktadır: 1. bölümde giriş bilgileri, 2. bölümde MR'ye dayalı KGT sistemi, 3. bölümde KGT transformatörü ve devre tasarımı, 4. bölümde bulgular ve 5. bölümünde sonuçlar açıklanmıştır.

2. MANYETİK REZONANSA DAYALI KGT SİSTEMİ (MAGNETIC RESONANCE BASED WPT SYSTEM)

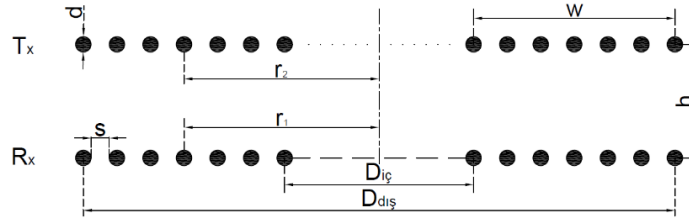
KGT sistemleri; besleme devresi, transformatör KGT sistemleri; besleme devresi, transformatör ve yük sistemi olmak üzere 3 ana bileşenden oluşmaktadır. Şekil 1'de temel bir KGT sisteminin blok şeması görülmektedir.



Şekil 1. KGT Sistemi blok diyagramı

Besleme devresi transformatör giriş geriliminin koşullandırıldığı bölümdür. Bir transformatörde birincil taraftan ikincil tarafa aktarılan elektrik enerjisi besleme kaynağının frekansına, manyetik nüve yapısına ve birincil ve ikincil devre sarım sayılarına bağlıdır. Demir nüveli transformatörlerde maksimum akı geçişi alçak frekans düzeylerinde sağlanabilirken, hava nüveli ve hibrit nüveli transformatör yapılarında aynı işlem yüksek frekans ile gerçekleştirilebilir. Bu nedenle KGT sistemlerinin endüstriyel uygulamalarında besleme devresi yüksek frekanslı inverter (YFİ) yapısındadır.

KGT sistemi transformatörlerinde, verici bobin (T_x) ve alıcı bobin (R_x) için çoğunlukla spiral dairesel geometrik yapılar tercih edilmektedir [21]. Şekil 2’de spiral dairesel bobinin geometrisi görülmektedir.



Şekil 2. Spiral dairesel bobin geometrisi

Bobinler oluşturuldukları geometrik yapıya ve manyetik ortamlara göre öz endüktans değerleri gösterirler. Bobinlerin öz endüktans hesabında çeşitli yöntemler kullanılmasına rağmen bu yöntemler içerisinde Wheeler yöntemi hem tek katmanlı ve çok katmanlı bobinlerin endüktans hesaplamalarında kullanılabilmesi, hem de hata payının düşük olması nedeniyle en çok tercih edilen yöntemlerin başında gelmektedir [17]. İçi dolu yuvarlak bir telden yapılmış spiral dairesel bir bobininin öz endüktansı Wheeler’ın yöntemine göre aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$L = \frac{31.33\mu_0 N^2 r^2}{8r + 11w} \quad 1$$

Burada; N bobinin sarım sayısı, r bobinin ortalama yarıçapı, w bobinin kalınlığıdır. Bobinlerin ortak endüktansının hesaplanmasında ise Neumann’ın formülü kabul gören bir formüldür [4]. Dairesel spiral bobinlerin ortak endüktans hesabında nümerik analiz yaklaşımlarıyla çözüm yapılır [18]. Bu yaklaşımlara göre dairesel spiral bobinlerin ortak endüktansı M ,

$$M = \frac{\mu_0 N_1 N_2}{4\pi} \iint \frac{r_1 r_2 \cos(\varphi - \varphi') d\varphi d\varphi'}{\sqrt{r_1^2 + r_2^2 + h^2 - 2r_1 r_2 \cos(\varphi - \varphi')}} \quad 2$$

ifadesi ile hesaplanabilir. Burada sırasıyla alıcı ve verici bobinlerin, r_1 ve r_2 ortalama yarıçapları, N_1 ve N_2 sarım sayılarıdır. h bobinler arası mesafedir.

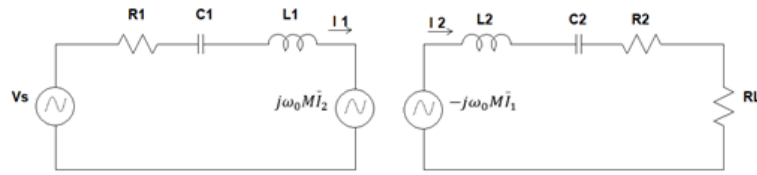
Eşitlik 1 ve Eşitlik 2’deki ifadeler hava nüveli bobinler için geçerlidir. Eğer manyetik nüve kullanılıyorsa eşitliklerdeki boşluğun manyetik geçirgenliği μ_0 yerine $\mu = \mu_0 \mu_r$ eşitliği kullanılmalıdır. Bu eşitlikte μ_r malzemenin manyetik geçirgenliğidir.

Alıcı ve verici bobinlerin öz endüktansları ve ortak endüktansı giriş sinyaline göre belli bir faz kaymalarına sebep olmaktadır. Bu faz kaymasını gidermek için devreye kondansatörler bağlanarak sistem rezonansa sokulmaktadır. KGT sistemlerinde, rezonans verim üzerinde kilit rol oynayan önemli bir parametredir [6, 19, 20]. Endüktansı L ve kapasitesi C olan bir devrede rezonans frekansı Eşitlik 3'deki ifadeyle hesaplanabilir.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad 3$$

Bu sistemlerinde rezonans işlemini sağlayacak olan kondansatörlerin devreye bağlanmasına göre devre topolojileri, Seri-Seri topolojisi (SS), Seri-Paralel topolojisi, Paralel-Seri topolojisi, ve Paralel-Paralel topolojisi isimlendirilir.

SS topolojisinde verici taraf bir akım kaynağı gibi davranarak sabit bir çıkış akımı verme eğilimindedir [7]. Dahası SS topolojisi geniş bir yük direnci aralığında diğer topolojilerden daha yüksek bir verime sahiptir [21]. Bu avantajlarından dolayı Şekil 3'te görülen SS topolojisi sıklıkla kullanılmaktadır [3, 22].



Şekil 3. Seri-seri topolojisi [21]

Bu devre yüksek frekanslı bir AC gerilim kaynağı (V_s) ile beslenir. Devrede R_1 , L_1 , C_1 verici tarafın, sırasıyla eşdeğer omik direncini, endüktansını ve kapasite değerini göstermektedir. R_2 , L_2 , C_2 , R_L alıcı tarafın, sırasıyla eşdeğer omik direncini endüktansını, kapasite değerini ve yük direncini temsil etmektedir [21]. Bu devrede alıcı ve verici tarafın gerilim eşitlikleri,

$$\begin{cases} \bar{V}_s = \dot{Z}_1 \bar{I}_1 + j\omega_0 M \bar{I}_2 \\ -j\omega_0 M \bar{I}_1 = \dot{Z}_2 \bar{I}_2 \end{cases} \quad 4$$

olarak yazılabilir. Burada \dot{Z}_1 ve \dot{Z}_2 sırasıyla verici ve alıcı tarafın eşdeğer empedansları ve ω_0 rezonans frekansındaki açısal frekanstır. Verici ve alıcı bobinlerden akan akımlar Eşitlik 5'te verilmiştir.

$$\begin{cases} \bar{I}_1 = \frac{\dot{Z}_2}{\dot{Z}_1 \dot{Z}_2 + \omega_0^2 M^2} \bar{V}_s \\ \bar{I}_2 = -\frac{j\omega M}{\dot{Z}_1 \dot{Z}_2 + \omega_0^2 M^2} \bar{V}_s \end{cases} \quad 5$$

Devre rezonans kondansatörlerinin değerleri Eşitlik 6'daki gibidir.

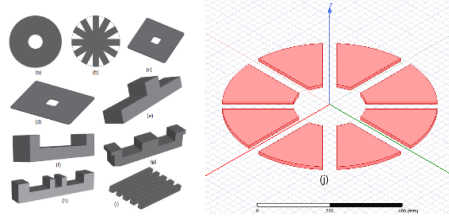
$$\begin{cases} C_1 = \frac{1}{\omega_0^2 L_1} \\ C_2 = \frac{1}{\omega_0^2 L_2} \end{cases} \quad 6$$

Rezonans durumunda yük ve kaynağı içeren tüm sistemin toplam verimi η Eşitlik 7'deki gibi verilebilir.

$$\eta = \frac{M^2 \omega_0^2 R_L}{(R_R + R_L)^2 R_S + M^2 \omega_0^2 (R_R + R_L)} \quad 7$$

Burada R_s direnci kaynak ve anahtarlama devresi eşdeğer direncidir.

nedenle yapılan çalışmalarda kısa mesafeler için tasarlanan KGT transformatörlerinde hava ve parçalı nüve birlikte kullanılmaktadır. Önceki çalışmalarda kullanılan dairesel, dairesel-çubuklu, kare, dikdörtgen, T-nüve, U-nüve, E-nüve, Çift U ve çubuklu nüve yapıları Şekil 5'te gösterilmiştir. Şimdiye kadar yapılan çalışmalarda farklı parçalı nüve yapıları kullanılmasına rağmen [28, 29], Şekil 5 (j)'de görülen Dairesel-Dilimli Parçalı (D-DP) ferrit nüve yapısı literatürde ilk defa bu çalışmada tasarlanmıştır.



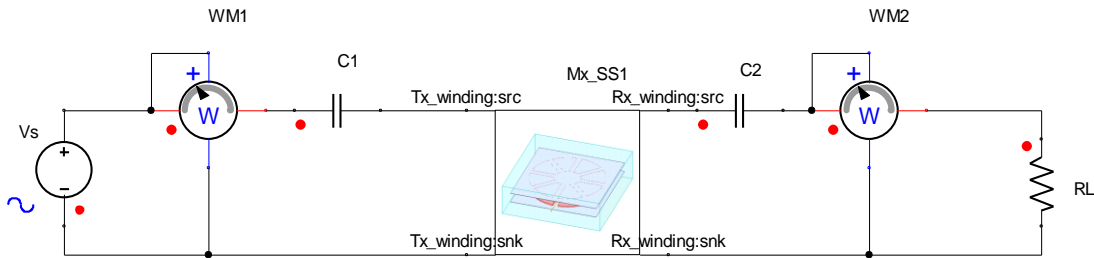
Şekil 5: (a) Dairesel (b) Dairesel-çubuklu (c) Kare (d) Dikdörtgen (e) T-nüve (f) U-Nüve (g) E-Nüve (h) Çift U (i) Çubuklu [16] (j) D-DP Nüve

D-DP nüve tasarımında, manyetik akı yolunun mümkün oldukça verici ve alıcı bobinler arasında kalmasını sağlayarak manyetik akı yönlendirmesini doğru şekilde yapmak amaçlanmıştır. Burada kullanılan D-DP nüve 10 mm kalınlığındadır. Dış yarıçapı 300 mm, iç yarıçapı 101 mm ölçülerindedir. Bu nüvede yüksek frekans çalışma uyumluluğundan dolayı ferrit malzeme kullanılmıştır.

Yapılan KGT transformatörü tasarımında kaçak akıyı minimuma indirerek kayıpları azaltmak amacıyla her bir bobin için D-DP nüvenin dış yüzeylerine bir alüminyum levha yerleştirilmiştir. Böylelikle akının bobinler arasındaki bölgede kalması zorlanmıştır.

3.2 KGT Devresi (WPT Circuit)

Tasarlanan KGT transformatör modeli ANSYS Simplorer ortamında SS topolojisine sahip bir devrede kullanılarak KGT devresi oluşturulmuştur. Şekil 6'da görülen bu devrede sinüzoidal kaynaktan KGT transformatörü beslenerek sabit bir omik R_L yükü üzerine güç aktarımı gerçekleştirilmiştir. Bu devrenin kurulum amacı ideal besleme koşulunda KGT transformatörünün maksimum verimini tespit etmektir. Bu devrede, yükün karalı olması ve besleme kaynağının sabit 220V gerilimli, 10 kHz frekanslı sinüzoidal bir kaynak olması bakımından ideal bir çalışma durumu söz konusudur. Bu ideal çalışma koşulları, tasarlanan transformatör sisteminin anma değerlerinin ve veriminin hesaplanması açısından önemlidir. Devrede R_L yükünün değeri maksimum güç transferini dikkate alınarak, ANSYS Maxwell'de Genetik Algoritma optimizasyon yöntemi kullanılarak 26.5 Ω olarak hesaplanmıştır.

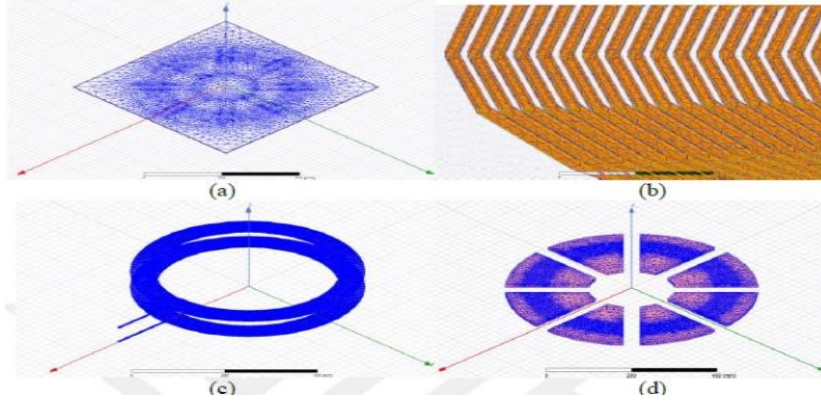


Şekil 6. Sinüzoidal kaynak beslemeli sabit omik yüklü KGT sistemi

4. BULGULAR (RESULTS)

Bu çalışmada önerilen düşük kayıp kuplajlı bir transformatörün SEY'e dayalı manyetik analizlerinden endüktans, ortak endüktans, bağlantı faktörü değerlerinin yanı sıra her bobinin direnç değeri, nüve ve sargı kayıpları elde edilmiştir. Manyetik analizlerde KGT sisteminin 3D model analizleri yapılmıştır. Daha sonra bu analiz sonuçları Şekil 6'daki benzetim devrelerinde kullanılarak KGT sistem verimi hesaplanmıştır.

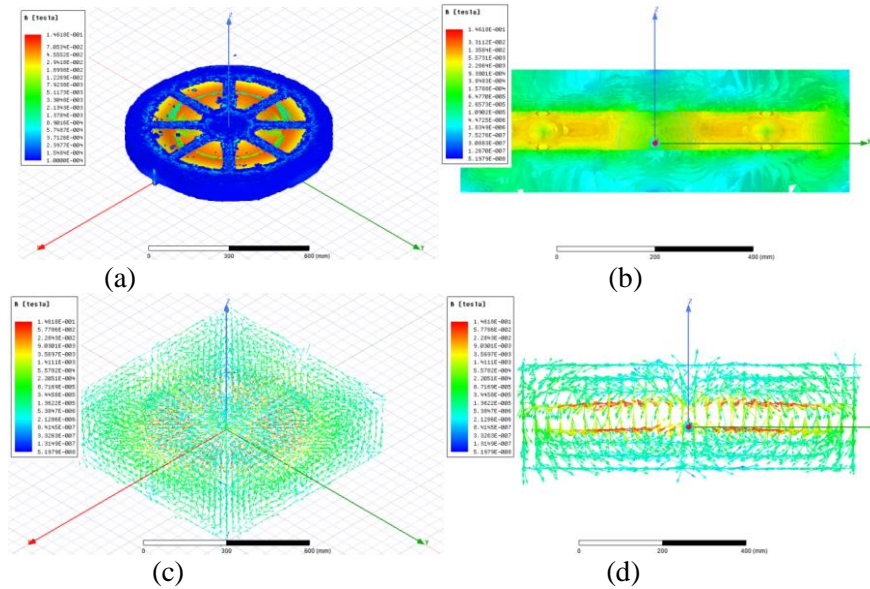
ANSYS Maxwell'de SEY'e dayalı 3D manyetik analizlerinde tetrahedron ağ yapısı kullanılmıştır. Bu yapı özellikle üç boyutlu manyetik alan hesaplamalarında güvenilir sonuçlar vermektedir. Şekil 7'de KGT transformatör parçalarının ağ yapıları görülmektedir.



Şekil 7. KGT transformatörü ağ uygulamaları

4.1 Manyetik Analiz Sonuçları (Magnetic Analysis Results)

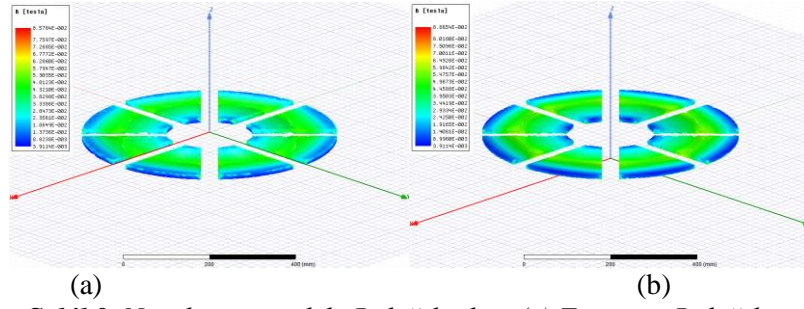
Bu analizlerde Şekil 5(j)'de görülen D-DP Nüveli KGT transformatörünün rezonans frekansında 3D SEY analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu analizlerden elde edilmiş manyetik akı yoğunluğunun (B) havadaki dağılımları Şekil 8'de verilmiştir.



Şekil 8. Transformatörün havadaki B dağılımları: (a) 3D model B skaler dağılım (b) Yan profil B skaler dağılım (c) 3D model B vektörel dağılım (d) Yan profil B vektörel dağılım

Burada verici ve alıcı bobinler arasındaki maksimum B değeri 30-40 mT'dir. Alüminyum levhaların dış kısmında B 'nin 0.001 mT değerlerine düştüğü görülmektedir. Bobinlerin alt ve üst kısmına yerleştirilmiş olan bu levhalar manyetik akının yönlendirilmesinde başarılı olmuştur. Levha bulunmayan yan bölgelerde ise B yaklaşık 0.15 mT büyüklüğünde olup, kaçak akıların az da olsa var olduğu görülmektedir.

Şekil 9'da nüveler üzerindeki B dağılımları gösterilmiştir. Şekil 9 (a)'daki verici taraf nüvesi üzerinde maksimum B değeri 80 mT, bobin hizasında bulunan bölgelerde en fazla 55 mT 'dır. Şekil 9 (b)'deki alıcı taraf nüvesi üzerindeki bobin hizası bölgelerde 55-60 mT, diğer bölgelerde 80-85 mT değerlerindedir. Nüve üzerinde doyum bölgesinde çalışma görülmemektedir.



Şekil 9. Nüveler üzerindeki B dağılımları (a) T_x nüvesi B dağılımı
(b) R_x nüvesi B dağılımı

Rezonans frekansında, 3D manyetik analizlerden elde edilen sonuçlar ve analitik hesaplamalardan elde edilen sonuçlar Tablo 1’de verilmiştir. Tablo 1’den de görüleceği gibi analitik sonuçlar ve benzetim sonuçlarının yaklaşık olarak uyumludur. Bağlantı (kuplaj) faktörü hava-ferrit hibrit nüve için 0.64 değerinde olup bu tür nüveler için iyi bir değerdir.

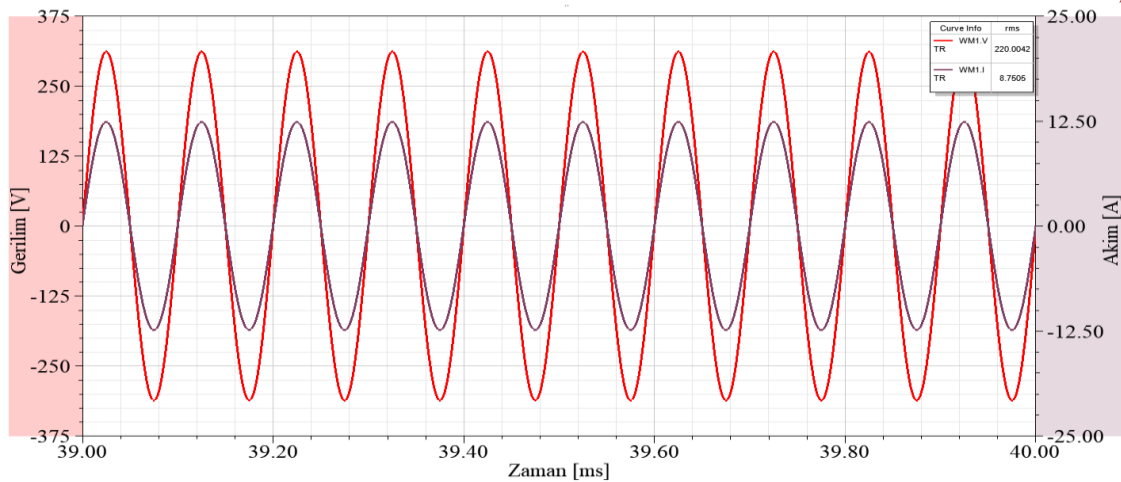
Tablo 1. Rezonans frekansındaki değerler

	ANSYS MAXWELL 3D	Hesaplanan Değer
LT_x (μH)	298.5245598	301
LR_x (μH)	298.5192085	301
k	0.641523069	0.64

4.2 Devre Analizleri Sonuçları (Circuit Analysis Results)

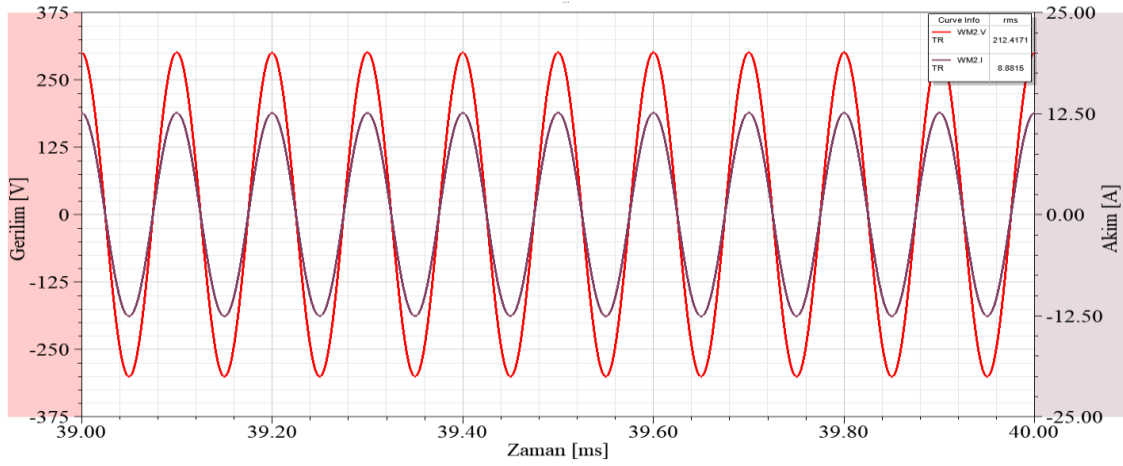
KGT devresinin analizlerinde Şekil 6’da görülen devrenin benzetimi gerçekleştirilmiştir. Bu analizler, manyetik analiz sonuçlarının benzetim devresine gömülerek çalıştırılmasından elde edilmiştir. Analiz sonucunda devrenin akım, gerilim, güç sonuçları elde edilmiştir.

Şekil 10’da verici tarafa ait akım-gerilim grafikleri görülmektedir. 10 kHz frekanslı 220 V’lik sinüzoidal bir kaynaktan 8.75 A bir akım, verici taraftan çekilmektedir.



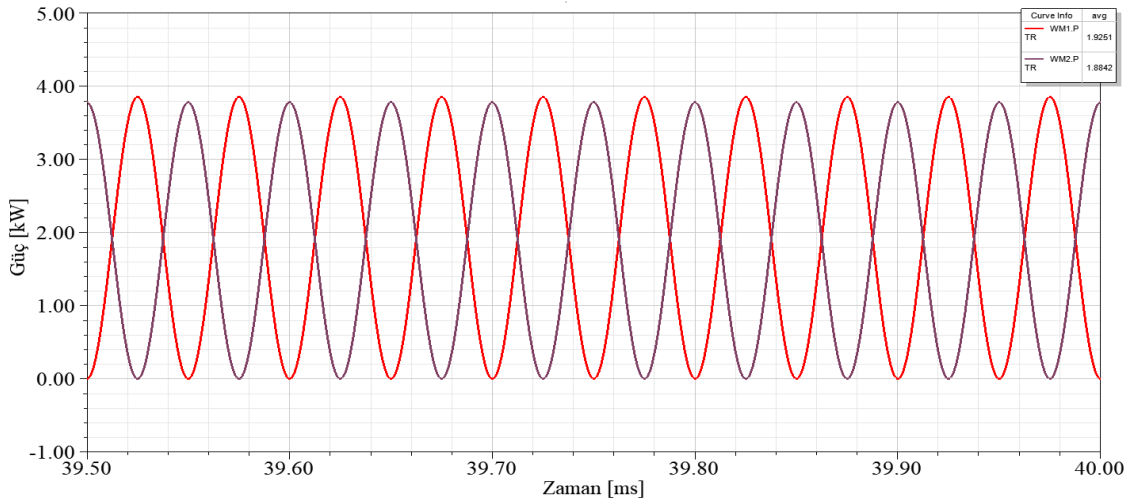
Şekil 10. Verici taraf akım-gerilim grafikleri

Şekil 11’de alıcı tarafa ait akım-gerilim grafikleri görülmektedir. Sistemin alıcı tarafına aktarılan gerilim 212.4 V’luk sinüzoidal bir gerilimdir. 26.5 Ω ’luk R_L yükü 8.88 A akım çekmiştir.



Şekil 11. Alıcı taraf akım ve gerilim grafikleri

Şekil 12’de verici ve alıcı taraflarına ait güç grafikleri görülmektedir. KGT sisteminde verici taraftan 1.92 kW değerinde bir güç, 1.88 kW olarak alıcı taraftaki yük üzerine aktarılmıştır.





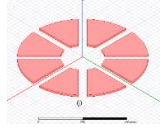


Şekil 12. Alıcı ve verici tarafların güç grafikleri

Alıcı ve verici tarafların akım ve gerilimleri arasında faz farkları bulunmaması ve güçlerin negatif değerler almaması sistemin rezonansa olduğunu doğrulamaktadır.

Genel bir değerlendirme açısından bu çalışmada önerilen D-DP ferrit nüveli KGT sistemi ve farklı geometrilerde nüve yapısına sahip literatürde yapılan çalışmalarda KGT sistemlerine ilişkin yapılan çalışmalarda kullanılan yöntemler ve verim sonuçları Tablo 2’de verilmiştir. Bu tablodan görüleceği gibi; Kaynak [30]’da 20 kHz rezonans frekanslı Paralel-Paralel devre yapısına sahip endüktif şarj sisteminde, hizalı pozisyonda 26.5 cm’lik hava aralığında şebekeden batarya yükü üzerine %90 verimle güç aktarımı yapılmıştır. Kaynak [31]’de 60 kHz rezonans frekanslı SS devre yapısına sahip endüktif bir güç kaynağı sisteminde, 0.1 cm ile 2.8 cm arası hava aralığında sırasıyla %93 - %85 toplam sistem verimi ile güç aktarımı yapılmıştır. Kaynak [5]’de 50 kHz rezonans frekanslı Seri-Paralel devre yapısına sahip manyetik rezonans güç aktarımı sisteminde, hizalı pozisyonda 20 cm’lik hava aralığında batarya yükü üzerine %90 verimle güç aktarımı yapılmıştır. Kaynak [3]’de 20 kHz rezonans frekanslı Seri-Seri devre yapısına sahip elektrikli araçları sürmek için tasarlanan manyetik rezonansa dayalı KGT sisteminde, hizalı pozisyonda 26 cm’lik hava aralığında batarya yükü üzerine %80 verimle güç aktarımı yapılmıştır. Bu çalışmada önerilen 10 kHz rezonans frekanslı Seri-Seri devre yapısına sahip D-DP ferrit nüveli KGT sistem ise 5 cm’lik hava aralığında, sinüzoidal bir kaynaktan sabit bir omik yük üzerine % 97 verim ile güç aktarımı gerçekleştirmiştir.

Tablo 2. Literatürde yapılan çalışmalar ve önerilen nüve yapılı KGT sistemi sonuçları

Nüve Geometrisi					
KGT Yöntemi	MR	MR	MR	MR	MR
Devre Topolojisi	Seri-Seri	Paralel-Paralel	Seri-Paralel	Seri-Seri	Seri-Seri
Sistem verimi	%85 [31]	%90 [30]	%90 [5]	80% [3]	%97
Hava aralığı	2.8 cm	26.5 cm	20 cm	26 cm	5 cm
Rezonans frekansı	60 kHz	20 kHz	50 kHz	20 kHz	10k Hz

5. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada cep telefonu şarjı, elektrikli araç şarjı vb. kısa mesafeli güç transferi uygulamalarında kullanılabilmesi amacıyla, 5 cm'lik hava aralıklı manyetik rezonans kuplajlı bir KGT sisteminin tasarımı yapılmıştır. Öncelikle düşük kayıp kuplajlı özgün bir KGT transformatörü tasarlanmıştır. Tasarlanan transformatörün D-DP ferrit nüve yapısı ilk defa bu çalışmada kullanılmıştır. Transformatörün bobin yapısı bakır yüksek frekanstaki deri ve yakınlık etkilerini önlemek amacıyla litz telden oluşturulmuştur. Transformatörün manyetik nüve yapısında ferrit malzeme kullanılmış olup alıcı ve verici bobinler arasındaki hava nüve 50 mm uzunluğundadır. Transformatörde kaçak akıları önlemek amacıyla D-DP nüvenin dış yüzeylerine alüminyum levhalar kullanılarak manyetik akı sargılar arasında kalmaya zorlanmış, bu sayede enerji kayıpları en aza indirgenmiştir. Transformatörün SEY ile yapılan manyetik analizleri sonuçları, nümerik olarak hesaplanarak doğrulanmıştır. Tasarlanan KGT transformatörü SS rezonans topolojisi ile bir benzetim devresi yardımı ile test edilmiştir. Bu devrede ideal koşulda transformatörün maksimum verimini tespit etmek amacıyla, 10 kHz frekanslı sinüzoidal kaynaktan transformatör beslemesi yapılarak sabit bir omik (R_L) yük üzerine % 97 verimle güç aktarımı gerçekleştirilmiştir. Bu verim değeri literatürde yapılan çalışmalarla karşılaştırıldığında önemli bir sonuç olduğu görülmüştür. Elde edilen bu sonuçlar önerilen D-DP nüve yapısının KGT transformatörü uygulamalarında başarı ile kullanılabileceğini göstermiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] E. Aydın, A. Pashei, E. Yıldırım, M. T. Aydemir, "Manyetik Rezonanslı Kuplaj ile Kablosuz Enerji Transferinde Hizalanmış ve Hizalanmamış Durumların Limitlerinin İncelenmesi," Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, vol. 30, no. 3, pp.1-6, 2018.
- [2] A. Pashei, E. Aydın, M. Polat, E. Yıldırım, M. T. Aydemir, "Elektrikli Araçlar için Temassız Güç Aktarım Sistemleri," EMO Bilimsel Dergi, vol. 6, no 11, pp. 1-12, 2016.
- [3] J. Shin, S. Shin, Y. Kim, S. Ahn, S. Lee, G. Jung, S.-J. Jeon, D.-H. Cho, "Design and Implementation of Shaped Magnetic-Resonance-Based Wireless Power Transfer System for Roadway-Powered Moving Electric Vehicles," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 61, no. 3, pp. 1179-1192, 2013.
- [4] T. Imura, Y. Hori, "Maximizing Air Gap and Efficiency of Magnetic Resonant Coupling for Wireless Power Transfer Using Equivalent Circuit and Neumann Formula," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 58, no. 10, pp.4746-4752, 2011.
- [5] H. Takanashi, Y. Sato, Y. Kaneko, S. Abe, T. Yasuda, "A large air gap 3 kW wireless power transfer system for electric vehicles," 2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), pp. 269-274, 2012,

- [6] A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J. D. Joannopoulos, P. Fisher, and M. Soljacic, "Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances," *Science*, vol. 317, no. 5834, pp. 83–86, 2007.
- [7] M. Cederlöf. "Inductive Charging of Electrical Vehicles," Stockholm: KTH, School of Electrical Engineering (EES), Electromagnetic Engineering", Master Thesis, 2012.
- [8] A. Karalis, J.D. Joannopoulos, M Soljacic, "Efficient wireless non-radiative mid-range energy transfer," *Annals of Physics*, vol. 323, no. 1, pp. 34–48, 2008.
- [9] A. L. Máñez. "Optimization of Inductive Resonant Coupling Links for low Power and Mid-Range Wireless Power Transfer", Master Thesis, 2014.
- [10] A. Ağçal, N. Bekiroğlu, S. Özçira, "Manyetik Rezonanslı Kuplaj ile Kablosuz Enerji Transferinde Hizalanmış ve Hizalanmamış Durumların Limitlerinin İncelenmesi," *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, vol. 30, no. 3, pp. 67-73, 2018.
- [11] R. Zhang, C. K. Ho, "MIMO Broadcasting for Simultaneous Wireless Information and Power Transfer," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 12, no. 5, pp. 1989-2001, 2013.
- [12] J. M. Miller, O. C. Onar, M. Chinthavali, "Primary-Side Power Flow Control of Wireless Power Transfer for Electric Vehicle Charging," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 3, no. 1, pp. 147-162, 2014.
- [13] K. Aditya, S. S. Williamson, "Design Guidelines to Avoid Bifurcation in a Series–Series Compensated Inductive Power Transfer System," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 66, no. 5, pp. 3973-3982, 2018.
- [14] S. Ludvik, P. Mojca, B. V. Boštjan, "Optimization, design, and modeling of ferrite core geometry for inductive wireless power transfer," *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, vol. 49, no. 1, pp. 145-155, 2015.
- [15] T. Diekhans , R. W. De Doncker, "A Dual-Side Controlled Inductive Power Transfer System Optimized for Large Coupling Factor Variations and Partial Load," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 30, no. 11, pp. 6320-6328, 2015.
- [16] C. Panchal, S. Stegen, J. Lu, "Review of static and dynamic wireless electric vehicle charging system," *Engineering Science and Technology, an International Journal*, vol. 21, no. 5, pp. 922-937, 2018.
- [17] B. Fincan, Ö. Üstün, "A study on comparing analytical methods for coil design in high frequency wireless energy transfer," 2015 IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies: Wireless Power (2015 WoW), Daejeon, South Korea: IEEE. 2015.
- [18] Y. Tezcan, H. Ünal, T. Sürgevil, M. Boztepe, "Optimum Coil Design Considering Skin and Proximity Effects for a Wireless Battery Charger of Electric Vehicle," 2017 World Electro Mobility Conference, 2017.
- [19] A. P. Sample, D. T. Meyer, J. R. Smith, "Analysis, Experimental Results, and Range Adaptation of Magnetically Coupled Resonators for Wireless Power Transfer," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 2, pp. 544-554, 2010.
- [20] T. Imura, "Study on maximum air-gap and efficiency of Magnetic Resonant Coupling for Wireless Power Transfer using Equivalent Circuit," 2010 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Bari, Italy, 2010.
- [21] G. Buja, M. Bertoluzzo, and K. N. Mude, "Design and Experimentation of WPT Charger for Electric City Car," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, no. 12, pp. 7436-7447, 2015.

- [22] S. Samanta, R. A. Kumar, "Small-Signal Modeling and Closed-Loop Control of a Parallel-Series/ Series Resonant Converter for Wireless Inductive Power Transfer," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 66, no. 1, pp. 172-182, 2018.
- [23] O. Kaplan "Kablosuz Güç Aktarımı İçin Karşılıklı Endüktans Hesaplama Aracının Geliştirilmesi," *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, vol. 7, no. 1, pp. 37-48, 2019.
- [24] J. Barranger, "Hysteresis and Eddy-Current Losses of a Transformer lamination Viewed as an application of the Poynting Theorem," *NASA Technical Note*, Cleveland, Ohio, 1965.
- [25] M. Budhia, G. A. Covic, J. T. Boys, "Design and Optimization of Circular Magnetic Structures for Lumped Inductive Power Transfer Systems," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 26, no. 11, pp. 3096 – 3108, 2011.
- [26] K. Ogawa, N. Oodachi, S. Obayashi, H. Shoki, "A study of efficiency improvement of wireless power transfer by impedance matching," *2012 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Innovative Wireless Power Transmission: Technologies, Systems, and Applications*, Kyoto, Japan, 2012.
- [27] S. Y. Choi, B. W. Gu, S. Y. Jeong, C. T. Rim, "Advances in Wireless Power Transfer Systems for Roadway-Powered Electric Vehicles," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 3, no. 1, pp. 18-36, 2014.
- [28] S. Li, C. C. Mi, "Wireless Power Transfer for Electric Vehicle Applications," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 3, no. 1, pp. 4-17, 2014.
- [29] O. C. Onar, J. M. Miller, S. L. Campbell, C. Coomer, C. P. White, L. E. Seiber, "Oak Ridge National Laboratory Wireless Power Transfer Development for Sustainable Campus Initiative," *2013 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*, Detroit, MI, USA, 2013.
- [30] H. H. Wu, A. Gilchrist, K. D. Sealy, D. Bronson, "A High Efficiency 5 kW Inductive Charger for EVs Using Dual Side Control," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 8, no.3, pp. 585-595, 2012.
- [31] A. J. Moradewicz, M. P. Kazmierkowski, "Contactless Energy Transfer System With FPGA-Controlled Resonant Converter," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 57, no.9, pp. 3181-3190, 2010.

Interaction of MoSe₂ Monolayer with Fe-Mn Atoms and FeMn Nanoatom Cluster

Ayşe DEMİRKIRAN 

Adnan Menderes University, Faculty of Science, Department of Physics, 09000, AYDIN.

Article Info:

Research article
 Received: 04/07/2019
 Revision 26/11/2019
 Accepted: 30/11/2019

Highlights

- The solution of the multi-particle Schrödinger equation
- Density Functional Theory.
- Different Stable Structure

Keywords

MoSe₂ monolayer
 Fe Atoms
 Mn Atoms

Graphical/Tabular Abstract

The identification of a system of electrons and ions interacting with each other can be done by quantum mechanics and the properties of this system can be obtained from the solution of the multi-particle Schrödinger equation. The solution of Schrödinger's equations requires large computational capacity. Increasing the number of points used to describe the problem leads to high memory usage and increased computation time. Density functional theory is a very popular and versatile method used in physics, chemistry and materials science to calculate the electronic structure of materials. In this study, MoSe₂ monolayer was created using this theory. The differences in the structures formed by Fe, Mn transition metals which are provided to be retained were investigated.

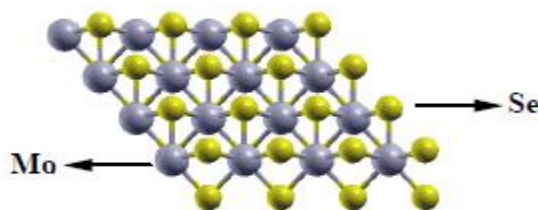


Figure A. Stable MoSe₂ monolayer

Purpose: The aim of this study is to investigate the interaction of Fe, Mn atoms and FeMn atomic clusters due to the importance of MoSe₂ monolayer which is a different semiconductor for transition metal.

Theory and Methods: The optimization of MoSe₂ monolayer by using quantum espresso 3.2 program in Linux operating system was achieved and the changes in the structures formed as a result of the interaction with Fe-Mn atoms used in nanoelectronic applications and catalysts were shown. In addition, the interaction of MoSe₂ monolayer with transition metals was created by using package programs, energy values were calculated and their stable structures were determined. Density functional theory is used in the solution of multi-electron systems.

Results: Mn, Fe, FeMn atomic and atomic clustered structures of transition metals of MoSe₂ monolayer were examined by generalized gradient approach using density functional theory. The changes in the properties of the resulting stable structures were examined and the differences in the magnetic properties were shown. In addition, it was determined how stable structures determined according to their holding energies change in different atoms.

Conclusion: The results of the study showed that the methods used and the potentials were appropriate when compared with similar literature studies. In addition, the results showed that the theory used was suitable for the semiconductor and transition metals studied.



MoSe₂ Tek Tabakasının Fe-Mn Atomları ve FeMn Nanoatom Kümesi ile Etkileşmesi

Ayşe DEMİRKIRAN 

Adnan Menderes Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, 09000, AYDIN.

Öz

Son yıllarda ilginç elektriksel ve optiksel özellikler sergileyen iki boyutlu yarı iletken malzemeler üretilmiştir. Tek tabakalı malzemelerde elektronlar farklı davranışlar göstermektedirler. Elektronlar tek tabakalı malzeme arasında hareket ettikçe, iki boyutta tutularak farklı özellikler sergilemektedirler. Bu kapsamda; molibden diselenad(MoSe₂) tek tabakasının optimizasyon sonucu kararlı yapısı, Linux işletim sistemi ve quantum espresso 3.2 programı ile elde edilip üzerinde çalışıldı. Öncelikle molibden(Mo) ve selenyum(Se) atomlarının bağ uzunluklarını belirleyerek, kararlı durumdaki MoSe₂ tek tabakası oluşturuldu. Bunun için kinetik enerji kesilme değeri, örgü değeri ve k nokta değerleri belirlendi. MoSe₂ tek tabakanın kararlı yapısını elde ederek bağlanma enerjisini, bağ uzunluğu hesaplandı. Belirlenen kararlı yapı üzerine Fe, Mn atomları ile FeMn atom kümesinin tutunmasının olası konfigürasyonları üzerinde çalışıldı. Bu konfigürasyonlar içerisinde en kararlı olan yapılar gösterildi. Fe-Mn atomlarının nano kümeleri, katalizörlerde ve nanoelektronik alanlarındaki uygulamalarından dolayı önemli olduğundan MoSe₂ tek tabakası ile Fe, Mn atomları ve FeMn atom kümesi arasındaki etkileşme incelendi.

Interaction of MoSe₂ Monolayer with Fe-Mn Atoms and FeMn Nanoatom Cluster

Abstract

In recent years, two-dimensional semiconductor materials have been produced which exhibit interesting electrical and optical properties. In monolayer materials, electrons behave differently. As the electrons move between the monolayer materials, they exhibit different properties by being held in two dimensions. In this context; molybdenum diselenide(MoSe₂) monolayer was obtained by optimization of stable structure, Linux operating system and quantum espresso 3.2 program. Firstly, by determining the bond lengths of molybdenum(Mo) and selenium(Se) atoms, a stable MoSe₂ monolayer was formed. For this purpose, kinetic energy cut-off value, lattice value and k-point values were determined. The binding energy and bond length were calculated by obtaining the stable structure of MoSe₂ monolayer. On the determined stable structure, Fe, Mn atoms and possible configurations of the attachment of FeMn atomic clusters were studied. The most stable structure of these configurations is shown. Since the nanoclusters of Fe-Mn atoms are important because of their applications in catalysts and nanoelectronic fields, the interaction between the MoSe₂ monolayer and Fe, Mn atoms and FeMn atomic clusters was investigated. Since the nanoclusters of Fe-Mn atoms are important because of their applications in catalysts and nanoelectronic fields, the interaction between the MoSe₂ monolayer and Fe, Mn atoms and FeMn atomic clusters was investigated.

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 04/07/2019
Düzeltilme: 26/11/2019
Kabul: 30/11/2019

Anahtar Kelimeler

MoSe₂ Tek Tabakası
Fe Atomları
Mn Atomları

Keywords

MoSe₂ Monolayer
Fe Atoms
Mn Atoms

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Teknolojinin gün geçtikçe ilerlemesi ile birlikte nanoteknoloji ve nanobilim üzerine yapılan araştırmalar da artmaya başlamıştır. Nanobilim, nanometre ölçütlerinde ortaya çıkan davranışları kuantum kuramı ile anlamaya çalışmaktadır. Nanoteknoloji ise nano yapıların yeni, farklı ve üstün özellikler kazanmasını sağlayan bir teknolojidir [1, 2]. Nanoteknoloji, yapısı ve bileşenlerinin farklı olmasının yanı sıra kendi nano boyutlarına bağlı olarak işlemler sergileyen malzeme ve sistemlerin üstün özelliklerini sunar [3]. Bu bakımdan pek çok ülke elektronik cihazların boyutlarının da giderek küçülmesi, nano yapıların veya

malzemelerin manyetik, elektriksel ve iletkenlik gibi kendilerine özgü özelliklerinin farklılıklar göstermesi nedeniyle bu konuya fazla yatırım yapmaktadır [4].

Son zamanlarda elektrokimyasal ve fotokatalitik sistemlerdeki çeşitli uygulamalarda yer almaya başlayan geçiş metali diklorojenitleri için MoSe_2 ilgi çekici bir yarıiletken [5, 6]. MoSe_2 'nin katmanlı yapısı ve selenyumun (Se) elektriksel iletkenliği, lityum-iyon ve sodyum-iyon piller gibi elektrokimyasal enerji depolama sistemlerinde karşı iyonları barındırmak için iyi bir fırsat sağlaması açısından MoSe_2 , üzerine yapılan çalışmalar önemlidir. Ayrıca, MoSe_2 ile fotokataliz ve fotoelektrokimyasal güneş pilleri için umut verici araştırmalar yapılmaktadır [5]. Bu çalışmada MoSe_2 tek tabakasının Fe-Mn ile etkileşmesinin incelenmesindeki amaç, manyetik özelliklerdeki değişimlerle elde edilen bulgular geçiş metali katkılmasının MoSe_2 tabanlı hedef teknolojik uygulamaların gelecekteki tasarımı için etkili bir strateji olduğunu göstermektedir. Yi Tian ve ark. [7] tarafından yapılan araştırmada değişen manyetik karakterlere sahip geçiş metalleri (Mn, Fe, Ni, Co) ile farklı alanlarda elektronik uygulamalara yönelik sonuçlar elde etmişlerdir. Tüm bu uygulamalar bir şekilde benzer olduğundan, bu makale ile amaç MoSe_2 'in geniş bir uygulama potansiyelleri hakkında da bilgi verip, yeni bir bakış açısı sunmaktır.

Yalıtkan, yarıiletken ve iletken yüzeylerin atomik yapısını, elektronik yapısını belirleyebilmek için birçok metod kullanılmaktadır. Üç boyuttan iki boyuta indikçe kuantum etkilerinin ortaya çıkması ile atom gruplarının üç boyutta sahip olmadığı özellikler ortaya çıkmaya başlamaktadır [8]. Bu değişim nano yapıların, kendilerine özgü özelliklerinin birçok alanda araştırılması konusunda önemli hale gelmiştir. Atomik boyutlardaki nano yapıların anlaşılması ve yapılan çalışmaların geliştirilmesi önemlidir. Bu yapıların üretilip teknolojiye kazandırabilmesi için, atomik boyutlardaki yapıların iyi incelenerek, yeni malzemeler dizayn edilmesi gerekmektedir [1-3]. Bu kapsamda; yapılan bu çalışma konusunda Linux işletim sisteminde quantum espresso 3.2 programı ile MoSe_2 tek tabakasının optimizasyon sonucu kararlı yapısı elde edilerek nanoelektronik uygulamalarında ve katalizörlerde kullanılan Fe-Mn atomları ile etkileşmesi sonucunda oluşan yapıdaki değişiklikler gösterilmiştir. MX_2 (M: geçiş metali, X: kalkojen atom) yapısındaki bileşenler, materyallerin değişik özellikler gösteren bir sınıfını oluşturmaktadır. Bu malzemelerin optoelektronik teknolojisinde de uygulama alanı mevcut olup, sensör yapımında da önemlidirler [9-12]. Özellikle düşük boyutlara inildikçe kuantum etkilerinin daha baskın olarak ortaya çıkması nedeniyle, malzemelerin sahip olduğu geometrik yapı ve kusurlar (boşluk kusuru, yabancı atom ile yer değiştirme, yabancı bir atomun yapıya tutunması) malzemenin fiziksel, elektronik ve optik özelliklerini son derece etkilemektedir [13]. Bu sebepten MoSe_2 tabakasının kararlı yapısı oluşturulup, bu alandaki araştırmacılara kaynak olması açısından ifade edildi.

2. MATERYAL ve YÖNTEMLER (MATERIAL and METHODS)

2.1 MoSe_2 Tek Tabaka (MoSe_2 Monolayer)

Son on yıldır nano bilim ve nanoteknolojide karbon atomu tabanlı bal peteği yapıları hâkim olmuştur. Bunlara örnek olarak grafin, karbon nano tüpler ve şeritler örnek verilebilir. Son yıllardaki çalışmalar, MX_2 (M; geçiş metali, X; kalkojen atom) yapıları grafenden daha iyi özelliklerde olabileceğini göstermiştir. Üç boyutlu MX_2 bileşenleri materyallerin en ilginç sınıflarından birini barındırır ve oldukça önemli özellikler gösterir. Bunların bulk yapıları oksit süperiletkenlik, yarı metalik manyetik, redoks reaksiyonlarında katalizi içerir [14]. Ayrıca iki boyutlu (2B) malzemeler, üzerine yoğun çalışmalar olan grafenin yüksek iletken stabil ultra ince yapısının keşfedilmesinden sonra büyük ilgi görmüştür. Grafenden sonra, MX_2 yapıları elektronik ve cihaz özellikleri sayesinde, daha çok dikkat çekerek, bir başka farklı malzeme sınıfını oluşmasını sağlamıştır [14]. 2B materyaller içerisinde, MX_2 yapıları farklı optik ve elektriksel özellikleri yanı sıra mekanik stabiliteyi sayesinde de temel araştırma, teknolojik ilerleme için üzerine çalışılan konulardır [15].

Şahin H. ve grubu [16], IV grup elementleri ve III-V grup elementlerinin ikili bileşikleri tek tabaka petek yapısını temel prensipler ilkesini kullanarak incelediler. Abou-Ras D. ve grubu [17] ise farklı sıcaklıklarda ince tabaka MoSe_2 için reaksiyon kinetiğini araştırdılar. Çalışma sonuçlarında 550 dereceden daha yüksek sıcaklıklar için dayanıklılığının artış gösterdiğini belirlediler. Bir başka çalışma ise Hao Cui ve grubu [18] tarafından iki boyutlu malzeme olan Pd katkılı MoSe_2 tek tabaka trafo yağlarındaki H_2 , CO ve diğerleri de dâhil olmak üzere yağdaki gazların algılanması veya uzaklaştırılması için gaz sensörü veya temizleyici olarak yapılan incelemelerdir. Sonuçta Pd- MoSe_2 tek tabakasının, CO molekülüne karşı güçlü bir

adsorpsiyon performansına sahip olduğu, böylece güvenli çalışmayı garanti etmek için bu tür kirleticilerin giderilmesine olanak sağlandığını buldular. Ayrıca, Pd-MoSe₂ tek tabakası, istenen adsorpsiyon ve desorpsiyon davranışları nedeniyle C₂H₂ tek algılaması için umut verici olduğunu belirttiler. Bununla birlikte, ortam sıcaklığında bile Pd- MoSe₂ tek tabakasının H₂ molekülü üzerindeki zayıf adsorpsiyon davranışı, H₂ dedektörü için uygun olmadığı sonucuna vardılar. Buldukları sonuçlarının MoSe₂ tek tabakası üzerindeki geçiş metali katkılamanın etkilerinin yanı sıra, Pd- MoSe₂ tek tabakasının elektrik mühendisliği alanındaki potansiyel uygulamasına ilişkin de fikir verdiğini ifade ettiler. Ayrıca son yıllarda Ren, J. ve grubu [19] tarafından yoğunluk fonksiyonel teorisi (YFT) ile Pd, Ag, Au ve Pt katkılı MoSe₂ tek tabakanın SO₂-algılama performansı çalışıldı. Sonuçlar, SO₂ gaz molekülünün MoSe₂ üzerindeki adsorpsiyonunun enerjisel olarak elverişli olduğunu göstermektedir, bu da en kararlı konfigürasyonlara yol açmaktadır. En belirgin şekilde, metal katkılı MoSe₂ tek tabaka, düşük maliyetli, yüksek oranda aktif ve kararlı katalizörler ve gaz sensörleri için iyi bir aday olabileceğini, yüksek aktif MoSe₂ tabanlı iki boyutlu gaz sensörlerinin tasarımını kolaylaştıracak bir yol sağladığını gösterdiler.

Li, H. Ve grubu [20] MoSe₂ tek tabakasını metal olmayan atomlarla katkılayarak, YFT ile yapısal, manyetik ve elektronik özelliklerini araştırdılar. Mo atomu ile bağlanmayı daha fazla tercih ettiğini ve bazı durumlarda yarı-metalik özellikler sergilediğini belirttiler. Tian, Y. ve grubu [7] ise Mn, Fe, Co ve Ni içeren MoSe₂ tek tabakasının atomik yapıları ve elektronik özelliklerini YFT kullanarak sistematik olarak incelediler. Katkılı tüm sistemler göz önüne alındığında yapısal analizlerin orijinal halini koruduğunu ifade ettiler. Bağlanma enerjilerinin Mn ile birleşimin diğerlerine göre termodinamik açıdan en uygun olduğunu ve Mo ile daha fazla bağlanma tercih edildiğini belirlediler. Başka bir çalışma Kandemir, A. ve grubunun [6] yaptığı araştırmadır. Yapılan çalışmada MoS₂ ve MoSe₂ tek tabakaların kafes termal iletkenliklerini klasik moleküler dinamik yöntemleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Atomlar arasındaki etkileşimleri verilen malzemelerin yapısal, mekanik ve titreşimsel özelliklerini temsil etmek için geliştirilen Stillinger-Weber ampirik bir potansiyel tanımlamışlardır. Her iki malzemenin özelliklerini de (bağ uzunluğu, örgü parametresi, yük yoğunlukları) YFT hesaplamaları ile karşılaştırdılar.

Truong, Q. D. ve grubu [21] Taramalı tünelleme mikroskopu ile YFT hesaplamalarına dayanarak katmanlı MoS₂ ve MoSe₂ geçiş metali diklojenidlerinde tane sınırlarının atomik yapılarını incelemişlerdir. MoSe₂ kristal yapısının, genelleştirilmiş gradyent yaklaşımı potansiyelini kullanarak, OpenMx paket programı ile YFT hesaplamalarını yapmışlardır. Ayrıca Lin, Z. ve grubu [22] Fe-B katkılama ile güçlü manyetik yarı-metalik özellik gösterdiğini, Fe-N katkılama yarıiletken özellik, Fe-C katkılama ile manyetik olmayan toprak durumu gösterdiğini belirlemişler. Görünür bölgede daha güçlü ve geniş bir absorpsiyon gözlemlendiği için görünür ışık cihazları açısından verimli sonuç elde etmişlerdir. Fe- NM (NM= B, N, C) katkılı MoSe₂ tek tabakasının ayırt edici manyetik yarı metalikliği, elektronik ve optik özelliklerinden dolayı optoelektronik cihazlar için umut verici olduğunu belirtmişlerdir. MoSe₂ tek tabakası üzerine yapılan farklı bir çalışma ise, Zhao, Y. ve grubu [23] tarafından araştırılmıştır. Çalışmada A metal katkılı MoSe₂ tek tabakasının manyetik özellikleri incelenmiştir. Sonuçta tek değerde elektron sayısına sahip a metal katkılamalarının manyetizmayı indükleyebildiğini, çift değerlikli elektron sayısına sahip a metal katkılamalarının ise manyetizmayı tetikleyemediğini bulmuşlardır. Yarı-metalik özellik gösteren katkılama durumlarını tespit etmişlerdir.

Yarı iletkenler transistör yapımında kullanılan yeni materyallerdir. Üzerine farklı çalışmalar yapmak yeni özellikler elde etmeye uygundur [24]. Şu ana kadar çok az sayıda MX₂ yapısındaki bileşikler sentezlenmiştir. Bu yüzden MoSe₂ tek tabakanın kararlı yapısını elde ederek bağlanma enerjisini, bağ uzunluğunu belirlendi. Fe-Mn atomlarının nano kümeleri katalizörlerde ve nanoelektronik alanlarındaki uygulamalarından dolayı önemlidir [25]. Uygulama alanlarındaki öneminden dolayı MoSe₂ tek tabakası ile Fe, Mn ve Fe-Mn arasındaki etkileşmesi incelendi.

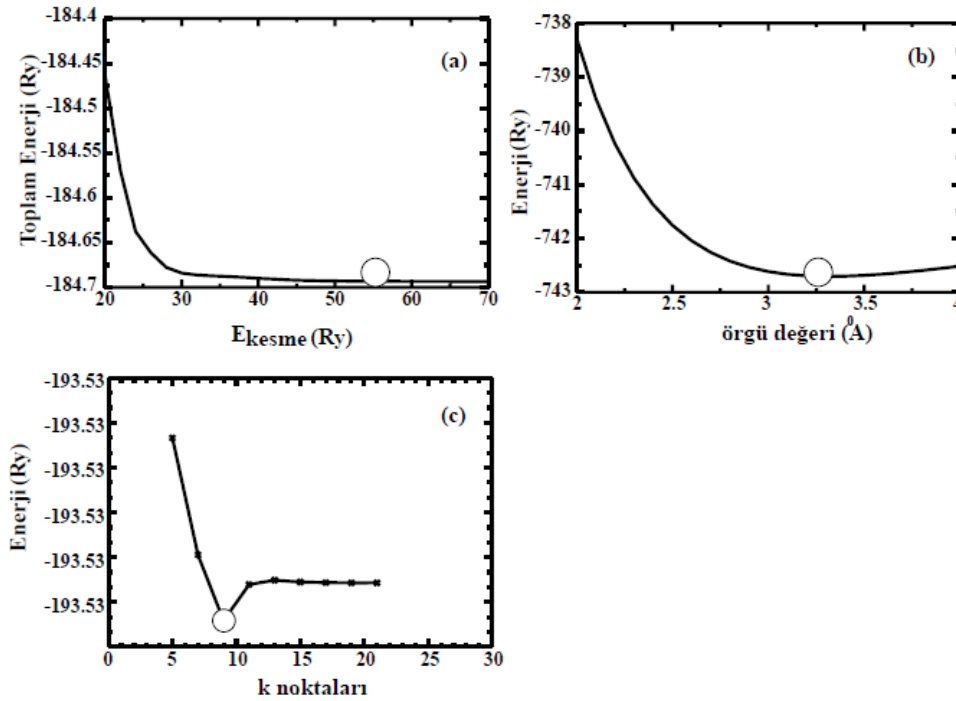
2.2 Hesap Detayları (Account Details)

Çalışmalar düzlem dalga baz setlerine dayalı Quantum Espresso paket programları kullanılarak hesaplandı ve MoSe için kesme enerjisi 718 eV olarak belirlendi, şekil 1(a)'da görüldüğü gibi. Bütün geometriler kullanılan programlardaki Perdew- Burke- Ernzerhof (PBE) değiş dokuş fonksiyonelleri ve ultrasoft potansiyelleri ile elde edildi. İki boyuttaki MoSe₂ tek tabakasının ara tabakalardaki diğer MoSe₂ tabakaları ile etkileşmelerini engellemek için, ara tabakalar (MoSe₂ tabakasının periyodik yapıları) ile olan mesafe 20 Å' alındı [1]. Bloch teoremi, çok parçacık problemini birinci Brillouin bölgesinde sonsuz k-noktası

problemine dönüştürdüğü için yalnızca kesikli sayıda k noktası kullanılan yaygın bir yaklaşım Monkhorst-Pack metodudur [26]. Bu sebepten Brillouin bölgesi $9 \times 9 \times 1$ moncarspack grid ve methfessel ve paxton metodu kullanılarak tanımlandı. Tutunma enerjisi aşağıdaki formül kullanılarak hesaplandı [13]:

$$E_{\text{tut}} = -(E_{\text{top}} - E_{\text{yüzey}} - E_{\text{atomkümesi}}) \quad (1)$$

E_{top} , atom (Fe, Mn) veya atom kümesi (FeMn) tutunmuş yüzeyin enerjisi, $E_{\text{yüzey}}$, atom veya atom kümesi tutunmadan önce ilk oluşturulan kararlı yüzeyin enerjisi iken $E_{\text{atomkümesi}}$, sadece atom veya atom kümesinin enerjisidir. Her bir tutunma durumunda ayrı ayrı hesaplanarak tutunma enerjileri ve durumlarının kararlı yapıları gösterildi. Örgü değeri 1×1 'de 3.28 \AA belirlenirken, 4 kat büyütülerek oluşturulan 4×4 'de ise $13, 92 \text{ \AA}$ olarak alındı [13]. MoSe₂ tek tabakasının kinetik enerji kesilme enerjisi, örgü değeri ve k noktalarının enerji ile değişimi şekil 1'de gösterilmiştir.



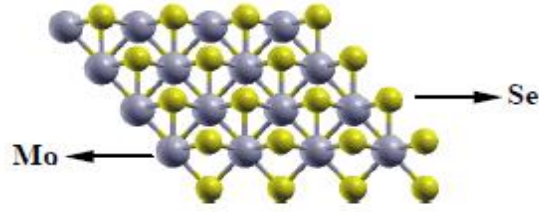
Şekil 1. MoSe dimeri için toplam enerjinin kesme enerjisi(a),örgü değeri(b),k noktalarına(c)göre değişim grafikleri [1]

MoSe₂ tek tabakasının örgü değeri 3.28 \AA , Mo-Se arası uzaklık 2.54 \AA olarak belirlendi. Bu değerler literatürle uyumludur ve literatürde sırasıyla 3.24 \AA ve 2.50 \AA olarak bulunmuştur. Yapılan çalışmada kararlı yapıda atomlar arasındaki açı değeri (83.05°) literatürle uyumludur (82.18°) [16].

3. BULGULAR (RESULTS)

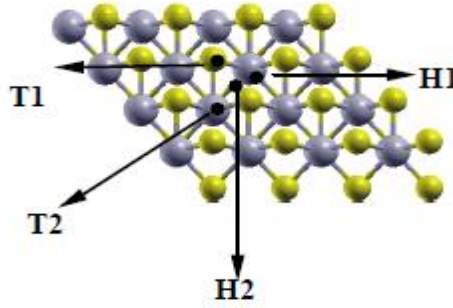
3.1 MoSe₂ Tek Tabakanın FeMn ile Etkileşmesiyle Elde Edilen Veriler (Data from the Interaction of MoSe₂ Monolayer with Fe-Mn)

MoSe₂ tek tabakanın kararlı yapısını belirlemek için öncelikle örgü değeri, kinetik enerji kesilme enerjisi ve k değerleri belirlendi. Daha sonra MoSe₂ yüzeyinin iterasyonlar sonucunda şekil 2'de görüldüğü gibi kararlı yapısı oluşturuldu. Kararlı yapının literatürde [20, 24] yapılan çalışmalarda belirlenen yapı ile uyumlu olduğu görüldü.



Şekil 2. $MoSe_2$ yüzeyinin kararlı yapısı [1].

Belirlenen kararlı yapı üzerine Fe, Mn atomları ile FeMn kümesinin tutunmasının olası konfigürasyonları şekil 3’de gösterildiği tepe ve çukur durumlarında verildi.

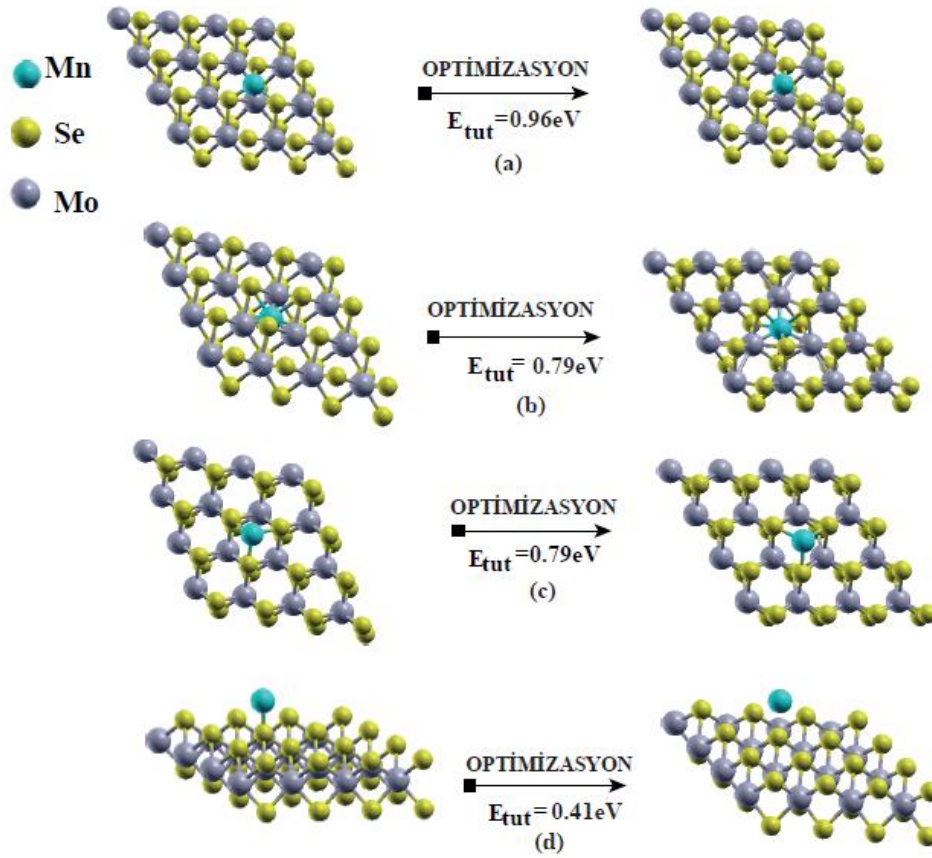


Şekil 3. Kararlı yapı üzerine atomların tutunma durumları, T1: Se atomu tepe durumu, T2: Mo atomu tepe durumu, H1:Se atomları ortasındaki çukur, H2: Se ile Mo atomları ortasındaki çukur durumu [1]

$MoSe_2$ tek tabaka yüzeyi için olası konfigürasyonlar atomlar arasındaki uzaklıklara bakılarak verildi. Bu uzaklıklar tablo 1’de gösterildiği gibi literatürle [24, 27] karşılaştırılarak ifade edildi. Tabloda gösterilen değerler arasındaki farklılıkların çalışmalarda kullanılan potansiyel farklılığından kaynaklı olacağı düşünülmüştür. Ayrıca tabloda verilen değerler (Fe-Se, Fe-Mo, Mn- Mo, Mn- Se arası uzaklıklar) bütün kararlı yapıları belirleyebilmek için başlangıçta kullanılmıştır.

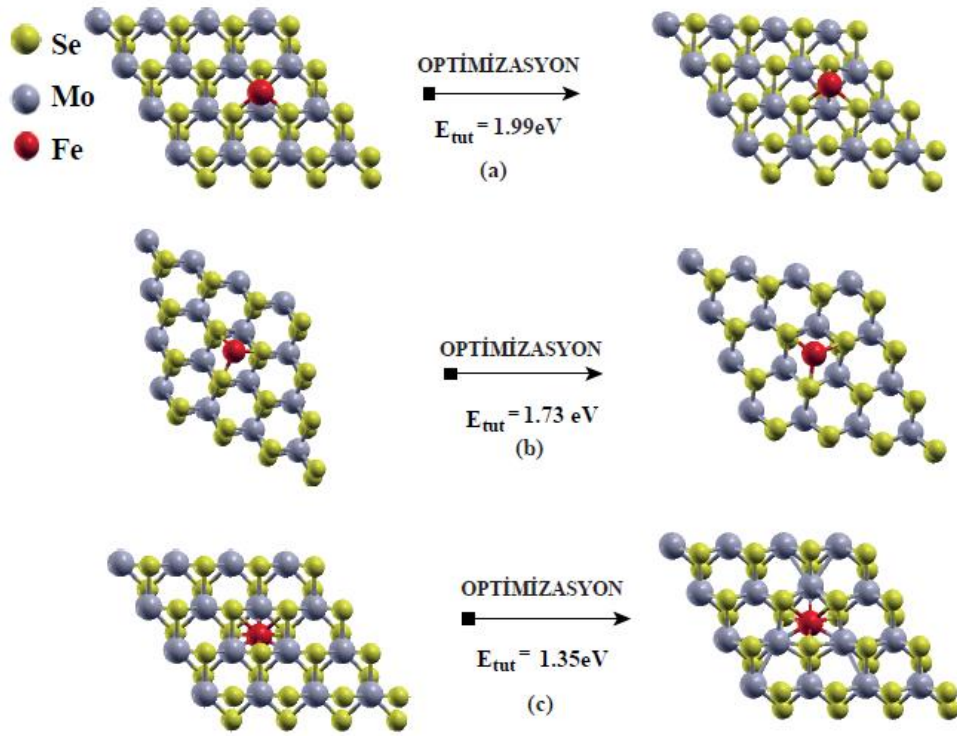
Tablo 1: İkili atomlar arasındaki bağ uzunlukları [1].

İkili Atomlar	Bağ Uzunlukları (Å)
Fe-Se	2.09
Ref.	2.06
Fe-Mo	2.16
Ref.	2.17
Mn-Mo	2.37
Ref.	2.33
Mn-Se	2.19
Ref.	2.17



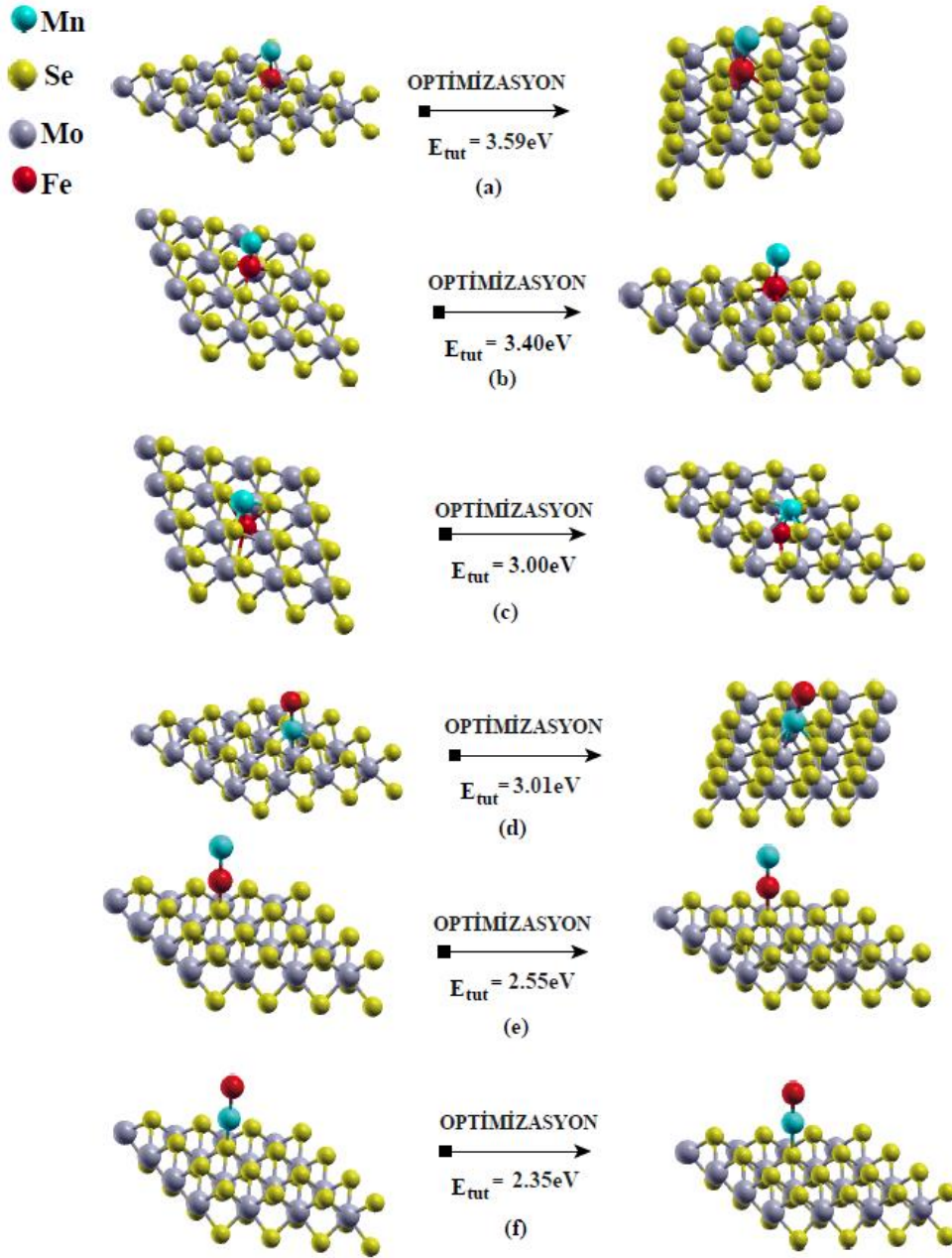
Şekil 4. Mn atomu tutunmuş MoSe₂ tek tabaka [1].

Mn atomu tutunmuş MoSe₂ tek tabaka için olası konfigürasyonlar belirlendi, şekil 4’de görüldüğü gibi. Bu konfigürasyonlar belirlenirken tablo 1 kullanılmıştır. Optimizasyon sonucunda yapıların son durumları gösterilmiş ve tutunma enerjileri hesaplanarak, bu enerjileri göz önüne alındığında kararlı yapının 0.96 eV değerine sahip yapının olduğu tespit edildi. Mo atomunun tepesine Mn atomu tutunacak şekilde verilen geometri kararlı yapıyı oluşturmaktadır şekil 4 (a) ‘da görüldüğü gibi. Mn atomu Mo atomu ile tepe durumunda bağ yapacak şekilde kalmayı tercih ederken, aynı zamanda Mn atomu Se atomlarıyla da bağ yapmıştır. İterasyonlar sonucunda oluşan kararlı yapının ortaya çıkması ile atomlar arasındaki mesafeler değişmiştir. Mn atomuyla Se atomları arası uzaklığı 2.32 Å olarak ölçülmüş olup, literatürde ise bu değer 2.17 Å idi, Mn atomunun Mo atomu ile uzaklığı 2.69 Å olduğu belirlendi ve literatürde 2.33 Å bulunmuştur. Manyetizasyon değeri ise 0.09 μ_B /atom dur.



Şekil 5. Fe atomu tutunmuş MoSe₂ tek tabaka [1]

Olası konfigürasyonlar içerisinde, kararlı yapının enerji değerlerine bakarak Fe atomunun Mo atomu ile tepe durumunda bağ yapacak şekilde bulunduğu konum olduğu belirlenmiştir, şekil 5 (a) görüldüğü gibi. Optimizasyon sonucunda da yine tepe durumunda kalmayı tercih etmiştir, şekil 5 (a, b)'de görüldüğü gibi. Fe atomunun Mo atomunun tepesinde bulunduğu kararlı yapının tutunma enerjisi 1.99 eV'dir. Optimizasyon sonucunda Fe atomu Mo ile arasındaki uzaklığı 2.59 Å olarak ölçülmüştür. Aynı şekilde optimizasyon sonucunda kararlı yapının Fe atomunun Se atomlarıyla arasındaki uzaklığı 2.32 Å ve literatür değeri tablo 1'den bakıldığında 2.06 Å'dur. Manyetizasyon değeri 0.03 μ_B /atom'dur.



Şekil 6. FeMn atom kümesi tutunmuş MoSe₂ yüzeyi [1].

FeMn kümesi tutunmuş MoSe₂ yüzeyinin olası konfigürasyonları şekil 6'da verilmiştir. Tutunma enerjilerine bakıldığında, MoSe₂ tek tabakası Mo atomunun Fe atomu üzerinden bağlanmayı tercih ettiği yapının olduğu görülmüştür. Fe atomu Mo tepe noktasına verilmesine rağmen optimizasyon sonucunda köprü durumuna geçmiştir. Kararlı yapının tutunma enerjisi 3.59 eV'dir, 0.13 μ_B /atom manyetizasyon değerine sahiptir. İterasyonlar sonucunda oluşan kararlı yapıdaki Fe atomu ile Se atomları arasında mesafe 2.31 Å iken tablodan bakıldığında değer literatürde 2.06 Å'dur, Mo atomu arasında uzaklık 2.88 Å iken, literatür değeri tablo 1'den bakıldığında 2.17 Å'dur.

4. SONUÇ (CONCLUSION)

MoSe₂ tek tabakası ile Mn, Fe, FeMn atom ve atom kümesi tutunmuş yapılar yoğunluk fonksiyonel teori kullanılarak genelleştirilmiş gradyent yaklaşımı ile incelendi. Öncelikle Mo-Se bağ uzunluğu belirlenerek MoSe₂ tek tabakası oluşturuldu. Mo-Fe, Se-Fe, Se-Mn, Mo-Mn ikili atom uzunlukları hesaplanarak, MoSe₂

tek tabakasına tutunmuş Mn, Fe, FeMn olası konfigürasyonları belirlendi. Bu yapılar incelenerek, en kararlı olanları enerji değerlerine göre tayin edildi. Bu belirlenen yapıların literatürle karşılaştırıldığında uyumlu olduğu görüldü. Mn tutunmuş yapının Mo ile tepe durumunda bağ yapan geometrinin diğer geometrilere göre daha kararlı olduğu ve geometri optimizasyonu sonucunda yine tepe durumunda kaldığı belirlendi. Tian, Y. ve grubunun yaptığı çalışmada Mn atomu ile birleşimin diğerlerine göre termodinamik açıdan da en uygun olduğu ve Mo ile bağlanma tercihinin daha fazla olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca Li, H. ve grubu tarafından yapılan çalışmada Mo atomu ile bağ yapmayı daha fazla tercih ettiği belirlenmiştir. Fe atomu tutunmuş MoSe₂ tek tabakasında da Fe atomunun Mo atomu ile tepe durumunda bağ yapacak şekilde verilen geometrisinin kararlı yapıyı oluşturduğu saptandı ve yine tepe durumunda kalmayı tercih ettiği gözlemlendi. FeMn ikili atomlarının tutunduğu MoSe₂ tek tabakasında Fe atomunun Mo atomuna tutunacak şekilde bağ yaptığı konfigürasyon, kararlı yapıyı oluşturduğu görüldü. Optimizasyon sonucunda Mn atomu tepe durumundan köprü durumuna geçmiş ve kararlı yapının tam tepe durumunda kalmayı tercih etmediği belirlendi. Kararlı yapılar oluştuktan sonra atomlar arasında değişen mesafeler, bu yapıların oluşturulması için belirlenen kararlı ikili atomların mesafeleri ile karşılaştırıldı. Elde edilen sonuç, iterasyonlarla atomlar arasındaki bağın değişen mesafelerle bazı durumlarda kopmasını açıklamaktadır (bkz. Şekil 4d).

Mn atomu tutunmuş kararlı yapının manyetizasyon değeri Fe atomu tutunmuş kararlı yapının değerine göre daha düşüktür. Bu değer, manyetik özellikli Mn atomunun bu özelliğini kaybetmiştir. FeMn ikili atom kümesi tutunmuş kararlı yapının manyetizasyon değeri ise sadece Fe ve Mn atomu tutunmuş kararlı yapılara göre daha yüksek manyetizasyon değeri göstermiştir. Tutunma enerjileri kıyaslandığında Mn tutunmuş kararlı yapının 0.99 eV, Fe tutunmuş yapının 1.99 eV ve FeMn tutunmuş kararlı yapının 3.40 eV olduğu görülmüştür.

YFT bu tür yapıları incelemek için oldukça etkin bir yöntemdir. Elde edilen sonuçlar deneysel verilerle uyumludur [28]. Demir-mangan gibi metalik ve manyetik özellik gösteren malzemeler için geliştirilmiş gradyent yaklaşımı (GGY) yöntemi oldukça başarılıdır [29]. Bu nedenle GGY yöntemi tercih edildi.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışmada yer alan nümerik hesaplamaların bir kısmı TÜBİTAK ULAKBİM, Yüksek Başarım ve Grid Hesaplama Merkezi'nin (TRUBA kaynakları) desteğiyle tamamlanmıştır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Demirkıran, A. 2014. Manyetik Nanoatom Kümelerinin Moleküllerle ve Yüzeyle Etkileşmesinin İncelenmesi, Adnan Menderes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Aydın.
- [2] Körözlü, N. 2016. Bilim ve teknolojinin geleceği nanoteknoloji. Ayrıntı Dergisi, 4(39), 27-30.
- [3] Ateş, H. 2015. Nano Parçacıklar ve Nano Teller, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part: C, Tasarım Ve Teknoloji, GU J. Sci. Part: C 3(1):437-442.
- [4] Demirkıran, A. 2019. Geleceğin Büyük Ayak Sesleri: Nanoteknoloji, Lambert Academic Publishing, Almanya.
- [5] Eftekhari, A. 2017. Molybdenum diselenide for energy storage, catalysis and optoelectronics, Applied Materialstoday, volume 8.
- [6] Kandemir, A., Yapıcıoğlu, H., Kınacı, A., Çağın, T. and Sevik, C. 2016. Thermal transport properties of MoS₂ and MoSe₂ monolayers. Nanotechnology, 27, 055703.
- [7] Tian, Y., Zhu, Z., Ge, Z., Sun, A., Zhang, Q. and Hung, S. 2019. Electronic and magnetic properties of 3d transition metal doped MoSe₂ monolayer, Phisica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures, Volume, 113745.
- [8] Ataca, C., Sahin, H. ve Ciraci, S. 2012. Stable, Single-Layer MX₂ Transition-Metal Oxides and Dichalcogenides in a Honeycomb-Like Structure. J. Phys. Chem. C, 116: 8983-8999.

- [9] Ma, S., Su, L., Jin, L., Su, J., Jin, Y. 2019. A first-principles insight into Pd-doped MoSe₂ monolayer: A toxic gas scavenger, *Physics Letters A* Volume 383, Issue 30, 125868.
- [10] Huang, S., Zheng, Q., Liu, S., Li, H., Li, C., Meng, J. and Tian, Y. 2017. Tuning electronic and magnetic properties in monolayer MoSe₂ by metal adsorption. *Chemical Physics Letters*, Volume 687.
- [11] MacNeill, D., Colin, H. Anderson, Z., Mak, K., Ralph, D. C., Kormanyos, A., Zolyomi, V. and Park, J. 2015. Breaking of valley degeneracy by magnetic field in monolayer MoSe₂. *Physical Review Lett.*, 114(3):037401.
- [12] Shaw, J. C., Zhou, H., Chen, Y., Weiss, N. O., Liu, Y., Huang, Y., Duan, X. 2014. Chemical vapor deposition growth of monolayer MoSe₂ nanosheets, *Nano Research*, ISSN: 1998-0124.
- [13] Kadioğlu, Y., Demirkiran, A., Yaraneri, H., Aktürk, Ü. O. 2014. Investigation of NH₃ and H₂ Adsorption on Ptn (n= 2–15, 18, 22, 24) Clusters by Using Density Functional Theory, *J. All. Comp.*, 591 (2014), 188–200.
- [14] Kandemir, A. and Şahin, H. 2018. Janus single layers of In₂SSe: A first- principles study. *Physical Review B*, 97, 155410.
- [15] Kandemir, A., Akbali, B., Kahraman, Z., Badabv, S. V., Ozcan, M., İyikanat, F. and Şahin, H. 2018. Structure, electronic and phononic properties of PtSe₂: from monolayer to bulk, *Semiconductor Science and Technology*, 33, 085002.
- [16] Şahin H., Cahangirov, S. Topsakal M., Bekaroğlu E., Aktürk E., Senger R.T., Ciraci S. 2009. Monolayer honeycomb structures of group-IV elements and III-V binary compounds: First-principles calculations, *Physical Review B* 80, 155453.
- [17] Abou-Ras D., Kistorz G., Bremaud D., Kurdesaub F. V., Tiwarib A.N., Dfbelic M, Kalin M. 2004. Formation and characterisation of MoSe₂ for Cu(In, Ga)Se₂ based solar cells, *Thin Solid Films* 480–481, 433– 438.
- [18] Cui, H., Chen, D., Zhang, Y. and Zhang X. 2019. Dissolved gas analysis in transformer oilwing Pd catalyst decorated MoSe₂ monolayer: A first- principles theory. *Sustainable Materials and Technologies*, volume 20.
- [19] Ren, J. ,Xue, Y. and Wang, L. 2019. SO₂ gas adsorption on the transition metal (Pd, Ag, Au and Pt) - doped monolayer MoSe₂: A first-principles study, *Chemical Physics Letters*, Volume 733, 136631.
- [20] Li, H., Huang, S., Zheng, Q., Zhu, Z., Li, C., Meng, J. and Tian Y. 2018. Nonmetal doping induced electronic and magnetic properties in MoSe₂ monolayer, *Chemical Physics Letters*.
- [21] Truong, Q. D., Hung, N. T., Nakayasu, Y., Nayuki, K., Sasaki, Y., Murukanahally Kempaiah, K., Yin, L., Tomai, T., Saito, R., and Honma, I. 2018. Inversion domain boundaries in MoSe₂ layers, *Royal Society of Chemistry*, 8, 33391.
- [22] Lin, Z., Ye, J. and An, Y. 2019. Tunable electronic structures, half-metallicity and optical properties in Fe-NM (B, C, N) co-doped monolayer 2H- MoSe₂, *Journal of Alloys and Compounds*, Volume 805.
- [23] Zhao Y., Wang, W., Li, C., Xu, Y. and He, L. 2018. Tuning the magnetic properties of the monolayer MoSe₂ by nonmetal doping: First-Principles Study, *Solid State Communications*, Volume 281.
- [24] Russo E. M. 2012. Monolayer Molybdenum Diselenide, *Chemistry, Biology, Gannon Uni.*
- [25] Maa L., Wang J., Hao Y., Wang G. 2013. Density functional theory study of FePd_n (n = 2–14) clusters and interactions with small molecules, *Computational Materials Science* 68 166–173.

- [26] Monkhorst, H. J. ve Pack, J. D. 1976. On special points for brillouin zone integrations. Physical Review B, 13: 5188.
- [27] Karağaç H. 2005. Structural, Electrical and Optical Characterization of Ge Implanted GaSe Single Crystal Grown by Bridgman Method, O.D.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans tezi, Ankara.
- [28] Aktürk, Ü. O. 2010. Density Functional Investigation of Nano Structures, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Ankara.
- [29] Yapıörer, E. 2007. TeO₂ Kristalinin Lineer ve Lineer Olmayan Optik Özelliklerinin İncelenmesi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.