



Dicle Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi

mühendislikdergisi
journal of engineering

Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi
mühendislikdergisi
Cilt: 14, Sayı: 2, Haziran 2023 ISSN: 1309-8640

Dicle Üniversitesi Adına yayın Sahibi / Privilige Owner
Mehmet Sıraç ÖZERDEM

Baş Editör / Editor-in-Chief
Mehmet Sıraç ÖZERDEM

Alan Editörleri / Field Editors
İbrahim KAYA
Fevzi SARITAŞ
İdris BEDİRHANOĞLU
Atilla Gencer DEVECİOĞLU
Bilal GÜMÜŞ
Abdurrahman SAYDUT
Muhammet Ali ARSERİM
Mehmet Sıraç ÖZERDEM
Senem YILMAZ ÇETİN

Tasarım-Dizgi / Designing-Editing
Mesut ŞEKER

Yazışma Adresi

Mühendislik Dergisi, Koordinatörlük ve Yayın Bürosu,
Dicle Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, 21280 Diyarbakır
Telefon : +90-412 241 10 00 (Dahili: 3637)
Elektronik posta : muhendislikdergisi@dicle.edu.tr
web : <http://dergipark.gov.tr/dumf>, <https://duje.dicle.edu.tr/journal/>

Dergide yayınlanan yazılar izinsiz başka bir yerde yayınlanamaz veya bildiri olarak sunulamaz.

ISSN Basılı Materyal: 1309-8640
Online ISSN: 2146-4391

Hakem Listesi / Reviewers List

Dergimize yayınlanmak üzere gönderilmiş olan makaleleri titiz bir şekilde değerlendiren kıymetli hakem hocalarımıza, değerli katkılarından dolayı teşekkür eder, katkılarının devamını dileriz.

We greatly appreciate the contributions made by the scientists, who worked as reviewers for Dicle University Journal of Engineering (DUJE) and we expect their contributions to the following journal issues.

Tufan DOĞRUEK (Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi)

İlyas EKER (Cumhuriyet Üniversitesi)

Kıvanç TAŞKIN (Eskişehir Teknik Üniversitesi)

Cüneyt VATANSEVER (İTÜ)

Ahmet KARAKAŞ (Kocaeli Üniversitesi)

Özgür EKİNCİOĞLU (İTÜ)

Arif GÖK (Kütahya Dumlupınar Üniversitesi)

Ahmet Sertaç KARAKAŞ (İstanbul Üniversitesi)

Rasim ÇEKİK (Şırnak Üniversitesi)

Mahmut Temel ÖZDEMİR (Fırat Üniversitesi)

Merve KALEM (Konya Teknik Üniversitesi)

Tevfik AĞAÇAYAK (Konya Teknik Üniversitesi)

Kemal POLAT (Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi)

Ugur CALIGULU (Fırat Üniversitesi)

Edip ÇETKİN (Batman Üniversitesi)

Eyyüp ÖKSÜZTEPE (Fırat Üniversitesi)

Fatma Zehra SOLAK (Konya Teknik Üniversitesi)

Emrah AYDEMİR (Sakarya Üniversitesi)

Nusret TAN (İnönü Üniversitesi)

Ali YÜCE (Malatya Turgut Özal Üniversitesi)

Cenk FENERLİ (Malatya Turgut Özal Üniversitesi)

Murat DOĞRUYOL (Siirt Üniversitesi)

Muhammet AYDIN (Fırat Üniversitesi)

Tayfun ABUT (Muş Alparslan Üniversitesi)

Burak ÖZBEY (Ankara Üniversitesi)

Kerim KARADAĞ (Harran Üniversitesi)

Doğan ÇELİK (Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi)

Sedat BİNGÖL (DU)

Heybet KILIÇ (DU)

Muhittin BAYRAM (DU)

Bilal GÜMÜŞ (DU)

M. Zahir DÜZ (DU)

Nasrettin GENLİ (DU)

Mehmet NERGİZ (DU)

İçindekiler / *Table of Contents*

Elektrik Elektronik Mühendisliği / Electrical and Electronics Engineering

- Dağıtım sistemlerinin yeniden yapılandırılması problemine PSO algoritmasının uygulanması (Araştırma Makalesi)
Application of PSO algorithm to reconfiguration problem of distribution systems (Research Article)
H. Lale Zeynelgil **215**
- Ses kayıtlarından otomatik keman müzik transkripsiyonu (Araştırma Makalesi)
Automatic violin music transcription from audio recordings (Research Article)
Kemal Avcı, Tamer Şevki Acuner **229**
- Optimal LQR Controller Methods for Double Inverted Pendulum System on a Cart (Research Article)
Tayfun Abut **247**
- Reducing Speed Ripples and Vibrations in Permanent Magnet Synchronous Motors with Unbalanced Loads (Research Article)
Faruk Erken, Oya Fidan, Seçil Karatay **257**
- Compare the classification performances of convolutional neural networks and capsule networks on the Coswara dataset (Research Article)
Abdulaziz Muhammad, Muhammet Ali Arserim, Ömer Türk **265**
- A Novel PI-PD Controller Tuning Method Based on Neutrosophic Similarity Measure for Unstable and Integrating Processes with Time Delay (Research Article)
Tufan Dogruer **273**
- Gauss karışım gürültüsü varlığında tek eşikli sezici ile maksimum olabilirlik sezici arasında performans karşılaştırması (Araştırma Makalesi)
Performance comparison between single threshold detectors and maximum likelihood detectors in the presence of Gaussian mixture noise (Research Article)
Mehmet Emin Tutay **283**
- Different DC-Link Control Methods with Multilevel Inverter for Low Harmonic and Efficient Power Transfer in Grid-Tied Hydrogen Fuel Cell Systems (Research Article)
Beyzanur Göncü, Ünal Yılmaz **289**

Makina Mühendisliği / Mechanical Engineering

- Sonlu Elemanlar Yöntemi ve Taguchi Metodu Kullanılarak Bir Kara Aracının Parametrik Olarak Optimum Tasarımının Geliştirilmesi (Araştırma Makalesi)
Developing Parametrically Optimum Design of a Land Vehicle Using the Taguchi Method and Finite Element Method (Research Article)
Osman Bahadır Özden, Barış Gökçe **305**

Combination of SX Steel with Copper Intermediate and GR5 (Ti6Al4V) Titanium Alloy by Diffusion Welding (Research Article)

Jiyan Güney, Haluk Kejanlı **315**

Model Predictive Trajectory Tracking Control of 2 DoFs SCARA Robot under External Force Acting to the Tip along the Trajectory (Research Article)

Sertaç Emre Kara, Osman Yiğid, Murat Şen, Mesut Hüseyinoğlu **325**

Maden Mühendisliği / Mining Engineering

Ultrasonik işlemin düşük dereceli kömürün kolon flotasyonu üzerine etkisi
(Araştırma Makalesi)

The effect of ultrasonic process on column flotation of low-grade coal (Research Article)

Kiraz Eşmeli **333**

İyon Baskılı Polimer Kullanılarak Bastnazit Cevherinden Seryumun Seçici Olarak Ayrılması (Araştırma Makalesi)

Selective Separation of Cerium from Bastnasite Ore Using Ion Imprinted Polymer (Research Article)

İbrahim Dolak **341**

İnşaat Mühendisliği / Civil Engineering

Betonda ince uçucu kül kullanımı ile ASR genişmesinin azaltılması (Araştırma Makalesi)
Decreasing ASR expansion by using fine fly ash in concrete (Research Article)

Hasan Eker, Demet Demir Şahin, Mustafa Çullu **351**

Key Factors that Affect the Behavior of Steel Beams and Columns in Special Moment Frames (Research Article)

Gülen Özkula **361**

Investigation of Favorable Neural Network Methods to Estimate Traffic Components (Research Article)

Sedat Özcanan **377**

Ağır Betonlardaki Güncel Gelişmelere Genel Bir Bakış (Derleme Makalesi)
Current Progresses in Heavy-weights Concrete: An Overview (Review Article)

İlker Bekir Topçu, İsmail Hocaoğlu, Fatimah Mohammed Adil Adil **385**

Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi (DÜMF) Mühendislik Dergisi yayınlarında varılan sonuçlar veya fikirlerin sorumluluğunu taşımamaktadır. Üniversite'nin, bu yayında ileri sürülen bilgi, alet, ürün veya işlevin doğruluğu, bütünlüğü, uygunluğu ve kullanılabilirliği konusunda bir yüklenimi ve iddiası bulunmamaktadır. Bu nedenle herhangi bir şekilde sorumlu tutulamaz.

Bu yayının herhangi bir kısmı, mühendislik dergisinin yazılı izni olmadıkça kaynak gösterilmeden yayınlanamaz, bilgi saklama sistemine alınamaz veya elektronik, mekanik, fotokopi, kayıt veya başka sistemlerle çoğaltılamaz.



Dağıtım sistemlerinin yeniden yapılandırılması problemine PSO algoritmasının uygulanması

Application of PSO algorithm to reconfiguration problem of distribution systems

H. Lale Zeynelgil^{1*}

¹ İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, zeynelgil@itu.edu.tr

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8327-9259>

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 9 Ocak 2023
Revizyon 31 Mart 2023
Kabul 21 Nisan 2023
Online 20 Haziran 2023

Anahtar Kelimeler:

Dağıtım sistemi, Yeniden yapılandırma, Optimizasyon, PSO (parçacık sürüsü) algoritması.

ÖZ

Bu çalışmada, dağıtım sistemlerinin kayıplar minimum olacak şekilde yeniden yapılandırılması amaçlanmıştır. Dağıtım sistemindeki farklı karakterli yükler nedeniyle şebekedeki hatlar günün puant saatlerinde ağır yüklenir ama geri kalan saatlerde hafif yüklenir. Bu durum güç kayıplarının büyük ve gerilim profilinin düşük olmasına yol açar. Şebekenin bu değişken yük durumundan olumsuz etkilenmemesi için, gün içinde yüklerin optimal olarak dağıtılması istenir. Bu amaçla, ağır yüklenmiş hatlardan hafif yüklenmiş hatlara yük aktarılır ve şebeke yeniden yapılandırılmış olur. Bu şekilde, hem şebekedeki kayıplar azaltılmış ve hem de baraların gerilim seviyesi de yükseltilmiş olur. Şebekenin yeniden yapılandırılması, bütün yüklerin beslenmesi koşuluyla, şebekede bulunan anahtarların konumlarının (açık/kapalı) değiştirilmesiyle gerçekleştirilir. Bu makalede dağıtım sisteminin yeniden yapılandırılması için ikili parçacık sürüsü optimizasyonu (IPSO) algoritması kullanılmıştır, çünkü PSO algoritması güç sistemlerinde doğrusal olmayan amaç fonksiyonlarını çözmek için sıklıkla kullanılan bir algoritma olup, ikili PSO algoritmasının kullanımı daha hızlı yakınsama sağlamaktadır. Algoritma için amaç fonksiyonu şebekedeki aktif güç kaybının minimum olmasını sağlayan anahtar kombinasyonu olarak belirlenmiş ve bilgisayar simülasyonları sonucunda, yeni şebeke yapısı için, şebekedeki kayıpların büyük oranda azaltıldığı ve şebekenin gerilim profilinin de iyileştirildiği görülmüştür. Elde edilen sonuçlar literatürde gelişmiş genetik algoritma, çekirge optimizasyon algoritması, harmoni arama algoritması, havai fişek algoritması ve guguk kuşu arama algoritması kullanılarak bulunmuş olan sonuçlarla karşılaştırılarak önerilen PSO algoritmasının üstünlüğü gösterilmiştir.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 9 January 2023
Received in revised form 31 March 2023
Accepted 21 April 2023
Available online 20 June 2023

Keywords:

Distribution Systems, Reconfiguration, Optimization, Particle swarm optimization (PSO) algorithm

Doi: 10.24012/dumf.1231678

* Sorumlu Yazar

ABSTRACT

In this study, it is aimed that the distribution network is reconfigured such that losses are minimized, Lines in the network are heavily loaded at the peak hours of the day but they are lightly loaded in other hours owing to different characterized loads. This state results that power losses are high and voltage profile is low. Since the network is not affected negatively from this variable loading situation, it is desired that the loads are optimally distributed during the day. For this purpose, the loads are transferred to lightly loaded lines from heavily loaded lines and the network is reconfigured. Therefore, both the losses in the network are reduced and the voltage level at the buses is increased. Reconfiguration of the network is realized with the status of the switches (on/off) are changed in the network, provided that all of the loads are supplied. In this paper, particle swarm optimization (BPSO) algorithm is used for reconfiguration of the distribution network because particle swarm optimization (PSO) algorithm is a frequently used algorithm to solve nonlinear objective functions in power systems and using of binary PSO algorithm provides faster convergence. Objective function for the algorithm is determined as the switch combination provided that real power losses are minimized and, it is seen that losses in the network are considerably decreased and voltage profile of the network is also improved for the reconfiguration of network, from the computer simulations. Superiority of the proposed algorithm is shown by comparing the obtained results with the results obtained by using enhanced genetic algorithm, grasshopper optimisation algorithm, harmony search algorithm, fireworks algorithm and cuckoo search algorithm in literature.

Giriş

Enerji ihtiyacı, sürekli artan nüfus ve sanayileşmeye bağlı olarak hızla artmaktadır. Günümüzde ülkelerin gelişmişlik seviyesini gösteren ölçütlerden biri de kişi başına düşen elektrik enerjisi tüketimi olmaktadır. Santrallarda üretilen elektrik enerjisi iletim ve dağıtım sistemleri üzerinden tüketicilere ulaşmakta ve bu esnada sistemin yapısına bağlı olarak elektrik enerjisinde kayıplar ve bozulmalar oluşmaktadır. Elektrik enerjisinin kalitesini belirleyen özellikler aşağıdaki gibidir [1]:

- Gerilimin sabit genlikli ve sabit frekanslı olması
- Faz gerilimlerinin ve faz akımlarının dengeli olması
- Sürekli enerjilendirme
- Büyük (1'e yakın) güç faktörü
- Belirli sınırları aşmayan harmonikler

Elektrik enerjine olan talebin hızla artması nedeniyle, hem temiz enerji kaynaklarının kullanımını arttırmak ve hem de var olan sistemin verimliliğini arttırmak amacıyla çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmaların amacı hem ekonomiklik ve hem de verimlilik açısından sistemdeki kayıpların azaltılmasıdır.

Kentsel dağıtım sistemlerindeki kayıp enerji genellikle tüketilen enerjinin % 3-4' ü mertebesinde [2]. Kırsal dağıtım sistemlerinde, daha geniş alanlara yayıldıkları için, enerji kayıpları bu değer iki katına çıkabilmektedir. Sistemdeki kayıpların azalmasıyla, tüketilemeyen enerji miktarı azalır ve parasal tasarruf ta sağlanır. Kayıpları azaltmak için aşağıda sıralanan bazı yöntemler kullanılabilir [3]:

- Mevcut donanımın yenilenmesi
- Transformatörlerin doğru seçilmesi
- Fazların dengelenmesi
- Talrp yönetimi
- Şebeke yapılandırması
- Kapasitör grupları kullanılması
- Dağıtık üretim
- Şebekenin yeniden yapılandırılması

Şebekenin yeniden yapılandırılması ile kayıpların azaltılması fikri ilk olarak Merlin ve Back tarafından ortaya konulmuştur [4]. Burada önce halka şebeke yapısı oluşturmak için şebekedeki bütün anahtarlar kapatılmış ve daha sonra anahtarlar art arda açılarak radial şebeke elde edilmiştir. Shirmohammadi ve Hong tarafından Merlin ve Back [4] yöntemine dayanan sezgisel bir algoritma önerilmiştir [5]. Bu algoritmanın sakıncası, şebekenin yeniden yapılandırılması esnasında anahtar konumlarının eşzamanlı değiştirilmemesidir. Civanlar ve ark., dağıtım sisteminin hat kayıplarını azaltacak şekilde yapılandırılması için sadece sezgisel algoritmayı ve anahtarlama işleminde dal değişimi yöntemini kullanmışlardır [6]. Bu yöntemin en büyük sakıncası, bir defada sadece bir çift anahtarlama işleminin yapılabilmesi olup, kayıplar azaltılmakta ama minimuma indirilememektedir. Baran ve Wu tarafından yapılan çalışmada, sezgisel algoritmadan yararlanılarak dal değişimi yöntemi kullanılmıştır [7]. Goswami ve Basu tarafından önerilen yöntemde, radyal bir şebeke oluşturmak için bir anahtarın kapanması başka bir anahtarın açılmasıyla tamamlanmaktadır [8]. Bu yöntem küçük sistemler için

uygun olmakla beraber büyük şebekelerde kullanışlı değildir, çünkü çok sayıda hesaplama içermektedir. Nara ve ark. tarafından, şebekenin yeniden yapılandırılması problemi için genetik algoritmaya (GA) dayanan bir yöntem önerilmiştir [9]. Bu yöntemle elde edilen çözümde, anahtarlama durumu, uygunluk fonksiyonu, gerilim düşümü ve mevcut kapasite limiti ile ilgili ceza değerleri bulunmaktadır. Sonuç olarak, kayıplar minimize edilmekle beraber çözüm çok uzun sürmektedir. Zhu, çaprazlama ve mutasyonları kullanarak genetik algoritmayı geliştirmiştir [10]. Literatürde, dağıtım şebekesinin yeniden yapılandırılması probleminin çözümünde GA' nın kullanıldığı başka çalışmalar da bulunmaktadır [11-14]. Bazı araştırmacılar tarafından, benzetilmiş tavlama (SA) yöntemi şebeke yapılandırılması probleminin çözümü için önerilmiştir [15-17]. Bu algoritma, teorik olarak kabul edilmiş olmakla beraber, herhangi bir pratik problemin çözümü için çok zaman almaktadır.

Bu çalışmada, dağıtım şebekesindeki kayıpları azaltmak ve gerilim profilini iyileştirmek için ikili parçacık sürüşü optimizasyonu (PSO) kullanılarak şebeke yeniden yapılandırılmıştır. Önerilen yöntem IEEE 33 baralı [7] ve IEEE 69 baralı [13] sistemlerde denenmiştir. Her iki sistem için bilgisayar simülasyonları ile elde edilen sonuçlar literatürdeki gelişmiş genetik algoritma, çekirge optimizasyon algoritması, harmoni arama algoritması, havai fişek algoritması ve guguk kuşu arama algoritması kullanılarak bulunmuş olan sonuçlarla karşılaştırılarak önerilen algoritmanın başarısı gösterilmiştir.

Elektrik Dağıtım Şebekeleri

Elektrik Piyasası Şebeke Yönetmeliği'nde, Türkiye'de nominal gerilimi 36 kV ve altında olan şebekelerin dağıtım şebekesi olarak kabul edildiği belirtilmektedir [18]. Dağıtım şebekeleri planlanırken, bölgenin coğrafi ve sosyoekonomik yapısı, sanayileşme hızı ile güncel enerji tüketim verilerinin de göz önüne alınması gerekir. Ayrıca, bölgede var olan veya potansiyel enerji kaynaklarının durumu da dikkate alınmalıdır. Bu nedenle, tüketicilere kaliteli elektrik enerjisi sağlanması amacıyla farklı şekillerde dağıtım şebekeleri tasarlanmaktadır. Dağıtım sistemleri yapılarına göre

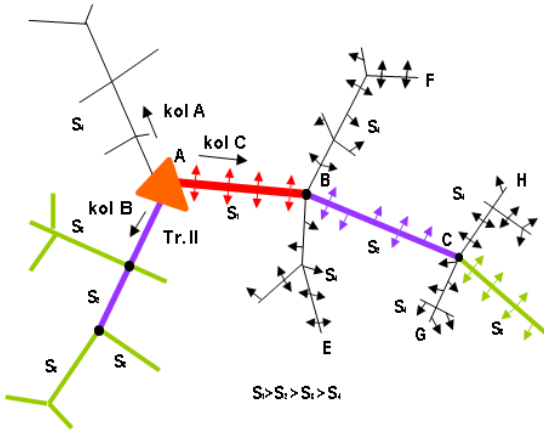
- Radyal (Dallı) Şebekeler
- Halka (Ring) Şebekeler
- Gözlu (Ağ) Şebekeler
- Enterkonnekte Şebekeler

olarak sınıflandırılır [19].

Radyal (Dallı) Şebekeler

Bu şebekeler genellikle bir transformatörden beslenir. Radyal şebekede, dağıtım transformatörü yük yoğunluğunun en fazla olduğu yerdedir ve ağaç dalları gibi önce kalın, daha sonra ince kollara ayrılan şebeke ile elektrik enerjisi tüketicilere kadar ulaştırılır. Bu nedenle, bu tip şebekeler dallı şebeke olarak ta adlandırılır [19].

Şekil 1'de verilen örnek şebeke göz önüne alındığında, A, B ve C olarak gösterilen ve dağıtım transformatörüne yakın yerlerde kullanılan hatlara ana hat ve E, F, G ve H ile gösterilen ve dağıtım transformatöründen uzaklaştıkça incelen hatlara branşman hattı adı verilir [19].



Şekil 1. Radyal şebeke yapısı [19].

Radyal şebekenin üstünlükleri:

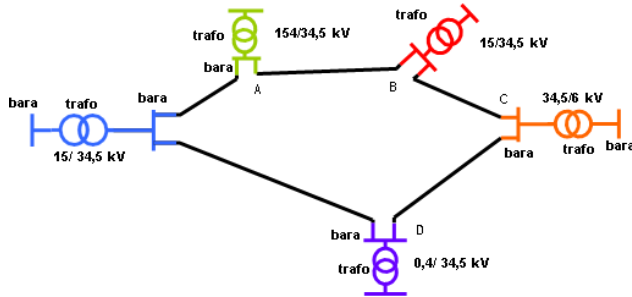
- Tesis masrafı diğer şebekelere göre daha azdır,
- Bakımı ve işletilmesi kolaydır,
- Şebekede oluşan bir arıza kolay tespit edilir.

Radyal şebekenin sakıncaları:

- Arıza giderilinceye kadar birçok abone enerjisz kalabilir,
- Transformatörden uzaklaştıkça gerilim düştüğü için hatlarda gerilim eşitliliği sağlanamaz.

Halka Şebekeler

Bu tip şebekelerde, tüketiciler birden fazla transformatör üzerinden beslenirler ve bütün transformatörler kapalı bir halka oluşturulur (Şekil 2) [19].



Şekil 2. Halka şebeke yapısı.

Halka şebekenin üstünlüğü:

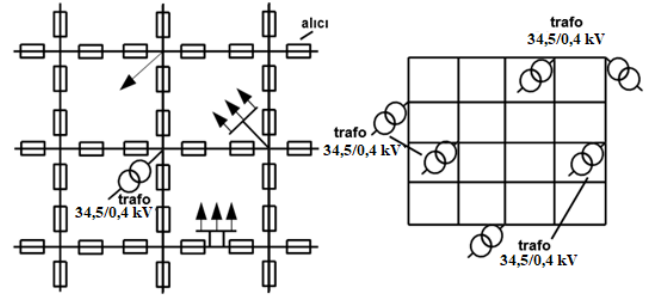
- Halka içinde herhangi bir yerde arıza olması durumunda, sadece arızalı kısım enerjisz kalır ve arızadan dallı şebekeye göre daha az tüketici etkilenir.

Halka şebekenin sakıncası:

- Beslenen bölgenin enerji ihtiyacı arttığında, halka şebekedeki hatlar, gerekli olan akımı taşıyamaz ve bütün hatların değiştirilmesi gerekir. Bu nedenle, halka şebeke radyal şebekeye göre daha masraflıdır [19].

Gözlü Şebekeler

Bu tip şebekelerde hatlar bir veya daha fazla transformatörden beslenebilirler [19]. Şekil 3'teki örnek şebekeden de görüldüğü gibi, hatlar bir ağ oluşturacak şekilde birbirine bağlanmıştır.



Şekil 3. Gözlü şebeke yapısı.

Gözlü şebekenin üstünlükleri:

- Bir arıza meydana geldiğinde, halka şebekede olduğu gibi, sadece arızalı kısım enerjisz kalır.
- Diğer şebekelere göre gerilim düşümü daha azdır.

Gözlü şebekenin sakıncaları:

- Ttek bir transformatör ile beslenen şebekede transformatör arızası durumunda bütün şebeke enerjisz kalır,
- Kısa devrenin etkisi diğer şebeke türlerine göre daha fazladır.
- Bakımı ve işletilmesi daha zordur.

Enterkonnekte Şebekeler

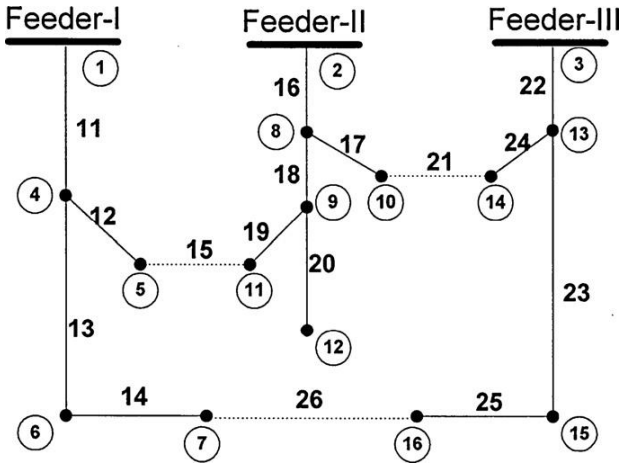
Enterkonnekte şebekeler özellikle büyük miktardaki enerji alışverişlerinin söz konusu olduğu bölgeler veya uluslararası enerji akışını sağlamak amacıyla oluşturulan şebekelerdir [19]. Bu tip şebekeler bölgelerdeki bütün üretim ve tüketim birimlerini içerir. Şebekede herhangi bir arıza durumunda, diğer bölgeler bu arızadan etkilenmez ve tüketicileri beslemeye devam ederler, dolayısıyla enerji kesintisi yaşanmaz. Her ülkenin kendi enterkonnekte sistemleri vardır ve aynı zamanda komşu ülkelerin enterkonnekte şebekeleri de birbirine bağlanabilmektedir

Yeniden Yapılandırma Problemi

Son zamanlarda, giderek artan elektrik enerjisi talebi nedeniyle, dağıtım sistemleri daha geniş ve daha karmaşık hale gelmektedir, ki bu durum daha yüksek sistem kayıplarına ve düşük gerilim profiline yol açmaktadır. Yapılan çalışmalar, dağıtım sisteminde Joule kayıplarının üretilen toplam gücün yaklaşık % 10-13'üne ulaştığını, bu durumun da hem dağıtım hatları boyunca enerji maliyetini arttırdığını ve hem de gerilim profilinin düşük olmasına yol açtığını göstermektedir. Bu nedenle, dağıtım şebekelerinin güvenilirliğini arttırmak giderek daha da önemli olmaktadır. Şebekenin yeniden yapılandırılması, dağıtım sistemlerinde gerilim kararlılığının artırılması ve kayıpların azaltılması için en çok kullanılan yöntemlerden biridir [20, 21].

Dağıtım şebekelerinin yeniden yapılandırılmasının amacı, genellikle, aktif güç kaybını azaltmak ve şebekedeki aşırı yükü hafifletmektir. Bunların yanısıra, arıza kaynaklı kesintilerde ve bakım nedeniyle yapılan planlı kesintilerde de yeniden yapılandırma kullanılmaktadır. Dağıtım şebekeleri, tüketicilerin sürekli beslenebilmesini sağlamak amacıyla gözlü şebeke olarak tasarlanırlar, ancak işletilmesi daha kolay olduğu için radyal şebeke olarak işletilirler.

Şebekenin yeniden yapılandırılması, anahtarların açık/kapalı durumları değiştirilerek kayıpları minimuma indiren ve gerilim kararlılığını arttıran radyal şebeke yapısının elde edilmesidir. Dağıtım sistemlerinde, genellikle, bağlayıcı (normalde açık) anahtar ve ayırıcı (normalde kapalı) anahtar olmak üzere iki çeşit anahtar kullanılır. Şekil 4' te verilen örnek şebekede, 10–14, 5–11 ve 7–16 no.lu düğümler arasındaki kesikli çizgiyle gösterilen dallarda bağlayıcı anahtarlar ve diğer dallarda ise ayırıcı anahtarlar vardır [12]. Çalışma koşulları değiştiğinde, hatlardaki omik kayıpları azaltmak için bu anahtarların açılması/kapatılması ile şebekenin yeniden yapılandırılması sağlanır. Burada önemli olan, dağıtım şebekesinin radyal yapısını korumak amacıyla, yükleri başka hatlara aktarmak için bir ayırıcı anahtar açıldığında, bir bağlayıcı anahtarın kapatılmasıdır.



Şekil 4. 16 baralı dağıtım şebekesi [12].

Yeniden yapılandırma sorunu matematiksel olarak aşağıdaki gibi ifade edilir []:

Amaç fonksiyonu:

$$\min P_L = \sum_{i=1}^N r_i \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} \quad (1)$$

Kısıtlamalar:

$$g(x) < 0 \quad (2)$$

$$V_{\min} < V_n < V_{\max} \quad (3)$$

$$I_i^{\min} < I_i < I_i^{\max} \quad (4)$$

$$\det(A) = 1 \text{ veya } -1 \quad (5)$$

Bu denklemlerde, P_L toplam aktif güç kaybını, L dal sayısını, P_i ve Q_i , sırasıyla, i dalından çekilen aktif ve reaktif güçleri, V_i i dalının gerilimini, r_i i dalının direncini, $g(x)$ güç akışı denklemlerini, V_n n düğümündeki gerilimi, I_i i dalındaki akımı, V_{\min} ve V_{\max} , sırasıyla, gerilim için alt ve üst sınır değerleri, I_i^{\min} ve I_i^{\max} , sırasıyla, i dalının akımı için alt ve üst sınır değerleri ve I bara bağlantı matrisini göstermektedir.

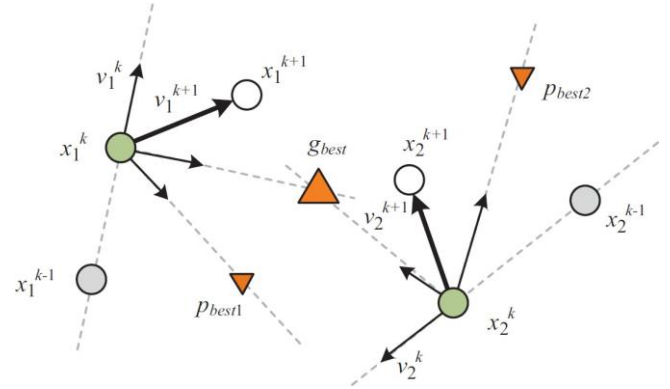
Parçacık Sürüsü Optimizasyonu (PSO)

Parçacık sürüsü optimizasyonu (PSO) bir sezgisel yöntem olarak ilk defa Kennedy ve Eberhart tarafından 1995'te ortaya konulmuştur [22]. PSO başlangıçta lineer olmayan sürekli problemlerin çözümünde kullanılmış, ancak bugün karmaşık problemlerin çözümünde çok kullanılan bir algoritma haline gelmiştir. Mevcut optimizasyon yöntemleriyle karşılaştırıldığında, PSO algoritması aşağıda sıralanan birçok önemli üstünlüğe sahiptir [23]:

- Türev içermez.
- Başka optimizasyon yöntemleriyle birlikte kullanılabilir.
- Amaç fonksiyonunun dışbükeylik veya süreklilik gibi özelliklerine duyarlılığı daha azdır.
- Düzeltilecek parametre sayısı daha az olduğu için, uygulanması ve programlanması daha kolaydır.
- Bölgesel minimumdan kaçma yeteneği vardır.
- Rastgele bir başlangıç çözümüyle iterasyona başlanabilir.

PSO algoritmasının mantığı, kuş sürüsünün hareketlerine dayanmaktadır: sürüdeki kuşlar yiyeceğe en yakın konumdaki kuşu takip ederler. PSO algoritmasında, popülasyondaki parçacıklar rastgele atanan başlangıç konumu ve hızıyla hareket etmeye başlar. Parçacıkların konumları ve hızları her iterasyonda güncellenir ve bulunan yeni koordinatlar bir fonksiyona gönderilerek parçacıkların hedefe olan uzaklıkları kaydedilir. En iyi çözümü elde etmek amacıyla, her iterasyonda parçacıkların konumları parçacığın en iyi değeri olan p_{best} ve popülasyondaki en iyi değer olan g_{best} büyüklükleriyle karşılaştırılarak güncellenir. Durdurma kriteri sağlandığında ya da maksimum iterasyon sayısına ulaşıldığında algoritma sonlandırılır [23].

Parçacıkların çözüm uzayındaki hareketi Şekil 5' te gösterilmiştir.



Şekil 5. PSO algoritmasında parçacıkların hareketi [24,25].

Probleme ilişkin çözüm uzayında n boyuttan oluşan m adet parçacık olduğu varsayıldığında, parçacık matrisi aşağıdaki gibi oluşturulur:

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix}_{m \times n} \quad (6)$$

Popülasyon matrisinde i . parçacık aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$x_i = [x_{i1} \ x_{i2} \ x_{i3} \ \dots \ x_{in}] \quad (7)$$

i . parçacığın önceki en iyi uygunluk değerini veren konumu ve sürüdeki en iyi parçacığın konumu sırasıyla aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$pbest_i = [p_{i1} \ p_{i2} \ p_{i3} \ \dots \ p_{in}] \quad (8)$$

$$gbest_i = [g_{i1} \ g_{i2} \ g_{i3} \ \dots \ g_{in}] \quad (9)$$

Sürüdeki i . parçacığın hızı da aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$v_i = [v_{i1} \ v_{i2} \ v_{i3} \ \dots \ v_{in}] \quad (10)$$

Buna göre, parçacıkların hızı ve konumu sırasıyla Denklem (11) ve Denklem (12) kullanılarak güncellenir:

$$v_{ij}^{k+1} = w * v_{ij}^k + c_1 * rand_1(.)_{ij} * (pbest_{ij}^k - x_{ij}^k) + c_2 * rand_2(.)_{ij} * (gbest_{ij}^k - x_{ij}^k) \quad (11)$$

$$x_{ij}^{k+1} = x_{ij}^k + v_{ij}^{k+1} \quad (12)$$

Denklem (11) ve Denklem (12)' de; $i=1, \dots, m$ ve $j=1, \dots, n$ olup, m popülasyonun büyüklüğü ve n arama uzayının boyutudur. Denklem (11)' de, $rand(.)$ [0, 1] aralığında rastgele bir sayıyı, x_{ij}^k , v_{ij}^k , $pbest_{ij}^k$ ve $gbest_{ij}^k$, sırasıyla, k . iterasyonda j . boyuttaki i parçacığının konumunu, hızını, en iyi konumunu ve bütünsel en iyi konumunu göstermektedir.

Denklem (11)' de, c_1 ve c_2 öğrenme katsayıları olup, c_1 katsayısı bir parçacığın kendi deneyimlerine göre hareket etmesini ve c_2 katsayısı ise popülasyondaki diğer parçacıkların kendi deneyimlerine göre hareket etmesini sağlamaktadır. Eğer öğrenme katsayıları küçük seçilirse, parçacıklar hedef bölgeden uzaklaşır ve arama uzayını genişletirler, dolayısıyla arama süresi uzar. Eğer öğrenme katsayıları büyük seçilirse, parçacıkların hedefe ulaşma süresi kısalır, ancak ulaşılmak istenen bölge gözden kaçırılabilir. Çalışmalar, dağıtım şebekesinin yeniden yapılandırılması probleminin çözümünde $c_1=c_2=2,0$ değerlerinin iyi sonuçlar verdiğini göstermiştir.

Denklem (11)' de, w atalet ağırlığı olup, değeri genellikle 0 ile 2 arasındadır. Atalet ağırlığının büyük olması bütünsel aramayı ve atalet ağırlığının küçük olması ise bölgesel aramayı kolaylaştırır. Dolayısıyla, atalet ağırlığı bölgesel ve bütünsel arama arasında bir denge sağlamaktadır. Bu nedenle, w değerinin incelenen probleme uygun olarak seçilmesi çok önemlidir. w atalet ağırlığının k . iterasyondaki değeri

$$w(k) = \frac{w_{max} - w_{min}}{max. iter} \times k \quad (13)$$

bağıntısı ile belirlenir; burada w_{max} ve w_{min} , sırasıyla, atalet ağırlığının maksimum ve minimum değerleri olup, k ise o andaki iterasyon numarasıdır.

Benzetim Çalışmaları

Bu çalışmada, PSO algoritmasının dağıtım sisteminin yeniden yapılandırılması problemine uygulanmış ve algoritmanın etkisini göstermek için IEEE 33 ve IEEE 69 baralı radyal test şebekeleri göz önüne alınmıştır.

Şebeke incelemesine başlanmadan önce aşağıdaki kabuller yapılmıştır [9]:

- Sistemdeki bütün yükler dengelidir.
- Analizler sürekli hal için yapılmıştır.
- Baralar arasında paralel hatlar yoktur ve her bir hatta bir anahtar vardır.
- Test edilen dağıtım şebekelerinin açık halka (radyal) şebeke olarak çalıştırıldığı varsayılmıştır.
- Sistem modelinde hatların süseptans değerleri sıfır alınmıştır, çünkü kısa hatlar söz konusudur.

PSO algoritmasının dağıtım şebekelerine uygulanmasında aşağıdaki adımlar izlenmiştir [26]:

Adım 1: PSO algoritması için gerekli olan ve aşağıda sıralanan parametrelerin değerleri belirlenir:

N : Maksimum iterasyon sayısı (50)

m : Popülasyon büyüklüğü (20)

n : Arama uzayının boyutu (bağlayıcı anahtar sayısı) (5)

c_1 ve c_2 : Öğrenme katsayıları ($c_1=c_2=2,0$)

w_{max} ve w_{min} Atalet ağırlığı için en büyük ve en küçük değerler ($w_{max}=0,9$, $w_{min}=0,4$)

Adım 2: Rastgele bir başlangıç konum matrisi (x_{ij}) ve bölgesel en iyi konum matrisi ($pbest_{ij}$) oluşturulur. Ayrıca, $rand(.)_{ij}$ fonksiyonu ile bir başlangıç hızları matrisi tanımlanır. Bu çalışmada, bu matrisler 20×5 mertebelidir.

Adım 3: Algoritmanın uygulanacağı şebekeye ilişkin veriler programa girilir ve güç akışı analizi yapılır. Şebekenin radyallığını korumak için, aralarında bağlayıcı anahtar olan baralara 0 ve aralarında ayırıcı anahtar olan baralara 1 değeri atanarak bara bağlantı matrisi oluşturulur:

$$I = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 0 \\ 1 & 0 & \dots & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 1 & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

Adım 4: Her bir parçacık için hız ve konum belirlenir. Bu amaçla, parçacıklara ilişkin konum ve hız bilgileri aşağıdaki döngü kullanılarak her iterasyonda güncellenir ve 20×5 mertebeli matris biçiminde kaydedilir.

for $j = 1:N$

$$v_{ij}^{k+1} = w \times v_{ij}^k + c_1 \times rand_1(.)_{ij} \times (pbest_{ij}^k - x_{ij}^k) + c_2 \times rand_2(.)_{ij} \times (gbest_{ij}^k - x_{ij}^k)$$

if $rand < S(v_{ij})$

$x_{id} = 1$

else

$x_{id} = 0$

end

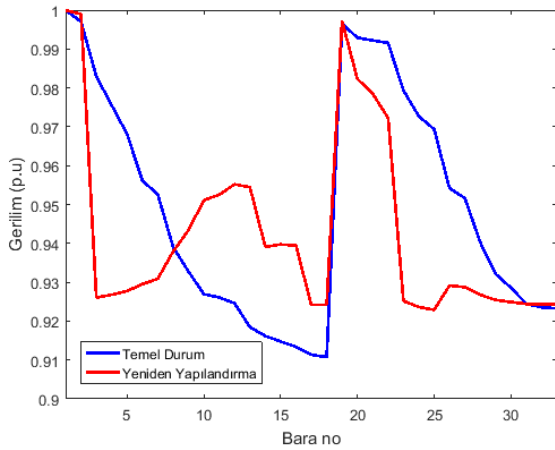
end

Tablo 1. 33 baralı şebeke için elde edilen sonuçlar.

Durumlar	Açık Anahtarlar	Güç Kaybı (kW)	Minimum Gerilim (p.u.) – Bara No.	Kayıp Azaltma Oranı (%)
Temel Durum	33-34-35-36-37	208,4592	0,91075 – (18)	–
Yeniden Yapılandırma	2-13-16-33-37	112,6833	0,9229 – (25)	45,9447

Tablo 2. 33 baralı şebeke için literatür karşılaştırması.

Durumlar	Açık Anahtarlar	Güç Kaybı (kW)	Minimum Gerilim (p.u.)
Temel Durum	33-34-35-36-37	208,4592	0,91075
Yeniden Yapılandırma	2-13-16-33-37	112,6833	0,9229
GGA [11]	7-9-14-32-37	139,55	–
GOA [28]	4-14-15-22-33	130,8164	–
HSA [20]	07-14-09-32-37	138,06	0,9342
FWA [29]	07-14-09-32-28	139,98	0,9413
CSA [21]	7-9-14-32-37	138,87	0,94235



Şekil 7. 33 baralı test şebekesindeki gerilim profili.

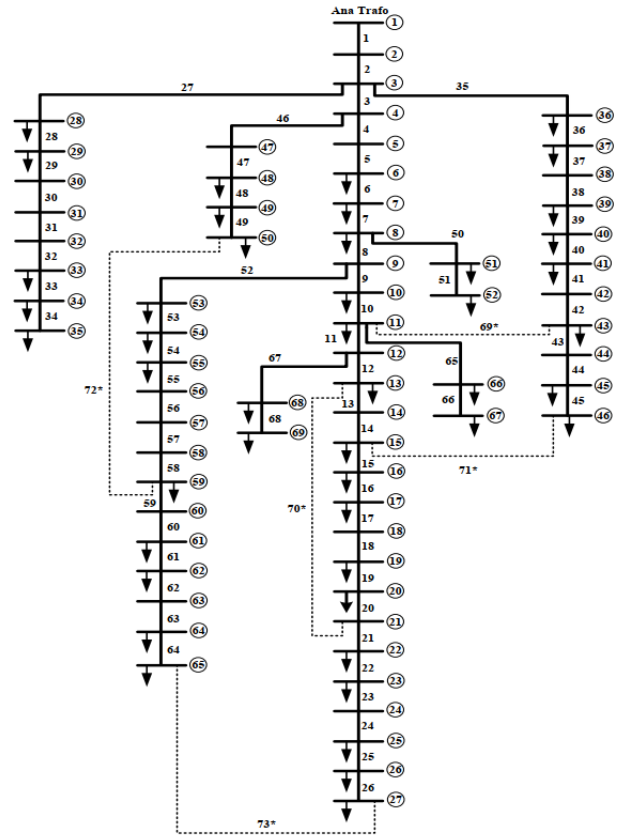
IEEE 69 Baralı Radyal Dağıtım Şebekesinin Yeniden Yapılandırılması

IEEE 69 baralı radial dağıtım şebekesinde 68 ayrııcı anahtar ve 5 bağlayıcı anahtar vardır (Şekil 8). Şebekeye ilişkin hat ve yük bilgileri Ek B' de verilmiştir. 69 baralı test şebekesindeki toplam aktif ve reaktif yükler sırasıyla 3,80 MW ve 2,69 MVAR olup, normal çalışma koşullarında 69, 70, 71, 72, 73 nolu anahtarlar açıktır.

Önerilen PSO algoritması kullanılarak, IEEE 69 baralı test şebekesindeki kayıpların minimum indirilmesi için en uygun anahtarlama kombinasyonu

- 14 ve 15 no.lu baralar arasındaki 14 no.lu anahtarın
- 58 ve 59 no.lu baralar arasındaki 58 no.lu anahtarın
- 61 ve 62 no.lu baralar arasındaki 61 no.lu anahtarın
- 11 ve 43 no.lu baralar arasındaki 69 no.lu anahtarın
- 13 ve 21 no.lu baralar arasındaki 70 no.lu anahtarın

açık ve diğer anahtarların kapalı olduğu durum olarak belirlenmiştir.



Şekil 8. 69 baralı test şebekesi [13]

Bu kombinasyon için elde edilen sonuçlar Tablo 3' te verilmiştir. Tablodan, şebekenin yeniden yapılandırılması ile kayıpların % 55,72 azaltılmış ve gerilim profilinin büyük ölçüde iyileştirilmiş olduğu görülmektedir.

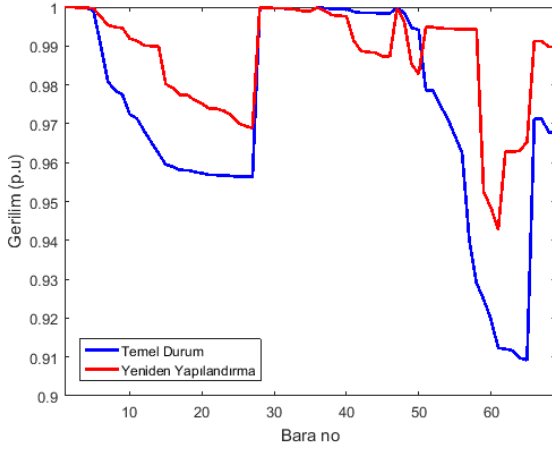
Şekil 9' daki grafikten, başlangıçta 65 no'lu bara en düşük gerilim seviyesine sahip iken, şebekenin yeniden yapılandırılmasıyla 62 no'lu baranın en düşük gerilim seviyesine sahip bara olduğu görülmektedir.

Tablo 3. 69 baralı şebeke için elde edilen sonuçlar.

Durumlar	Açık Anahtarlar	Güç Kaybı (kW)	Minimum Gerilim (p.u.) – Bara No.	Kayıp Azaltma Oranı (%)
Temel Durum	69-70-71-72-73	225,0007	0,90919	–
Yeniden Yapılandırma	14-58-61-69-70	99,62	0,94275	55,72

Tablo 4. 69 baralı şebeke için literatür karşılaştırması.

Durumlar	Açık Anahtarlar	Güç Kaybı (kW)	Minimum Gerilim (p.u.)
Temel Durum	69-70-71-72-73	225,0007	0,90919
Yeniden Yapılandırma	14-58-61-69-70	99,62	0,94275
HSA [20]	13-18-56-61-69	99,35	0,9428
FWA [29]	14-56-66-69-70	98,59	0,9495
CSA [21]	14-57-61-69-70	98,568	0,9495
GGA [11]	15-59-62-70-71	99,62	–



Şekil 9. 33 baralı test şebekesindeki gerilim profili

69 baralı test şebekesi için elde edilen sonuçların literatürdeki diğer algoritmalarla karşılaştırılması Tablo 4' te verilmiştir. Tablodan, bütün algoritmalarla bulunan anahtar kombinasyonlarının birbirine yakın olduğu görülmektedir. Önerilen PSO algoritması ile GGA algoritmasıyla aynı güç kaybı değeri bulunmuştur. Gerilim profili açısından ise, geliştirilen PSO algoritması ile HSA algoritmasıyla aynı gerilim değerinin bulunduğu görülmektedir.

Sonuçlar

Bu çalışmada, dağıtım şebekelerinin yeniden yapılandırılması probleminin çözümü için ikili parçacık sürüsü optimizasyonu (İPSO) algoritması kullanılmıştır. Yeniden yapılandırmanın amacı hem şebekedeki aktif güç kayıplarının azaltılması ve hem de baraların gerilim seviyelerinin yükseltilmesidir. Önerilen yöntem, IEEE 33 baralı ve IEEE 69 baralı radyal test şebekelerine uygulanmış olup, her iki test şebekesi için elde edilen sonuçlar literatürde gelişmiş genetik algoritma, çekirge optimizasyon algoritması, harmoni arama algoritması, havai fişek algoritması ve guguk kuşu arama algoritması kullanılarak bulunmuş olan sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Buna göre,

- Yeniden yapılandırma için önerilen PSO algoritması ile elde edilen en uygun anahtarlama kombinasyonu IEEE 33 baralı test şebekesi için diğer algoritmalarla elde edilen kombinasyonlardan oldukça farklıdır. Ancak, IEEE 69 baralı test şebekesi için bütün algoritmalarla birbirine yakın anahtarlama kombinasyonları elde edilmiştir
- Önerilen PSO algoritmasının uygulanmasıyla, kayıplar IEEE 33 baralı test şebekesinde % 45,94 ve IEEE 69 baralı test şebekesinde ise % 55,72 oranında azaltılmıştır. Literatürde bulunan çalışmalarla karşılaştırıldığında, önerilen PSO algoritmasının güç kaybı açısından IEEE 33 baralı test şebekesinde açık ara en iyi sonucu, IEEE 69 baralı test şebekesinde ise en iyi değere yakın sonuç verdiği görülmüş olup, güç kaybı değeri bütün algoritmalar için birbirine çok yakın değerlerde elde edilmiştir.
- Önerilen PSO algoritmasının uygulanmasıyla, baraların gerilim seviyeleri hem IEEE 33 baralı test şebekesinde ve hem de IEEE 69 baralı test sisteminde büyük ölçüde yükseltilmiştir.

Sonuç olarak, bu çalışmada dağıtım şebekesinin yeniden yapılandırılması probleminin çözümü için, diğer algoritmalarla göre daha basit yapıya sahip olması, daha az parametre ile en iyi sonucu bulabilmesi ve kullanımının kolay olması gibi üstünlükleri nedeniyle, PSO algoritması tercih edilmiştir. Simülasyon sonuçlarından, önerilen PSO algoritması ile şncelenen her iki şebeke için de en uygun veya en uygunu yakın çözümün elde edilebildiği görülmüştür.

Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur.

Hazırlanan makale A. Çakır'ın yürütücüsü olduğum yüksek lisans tezinden türetilmiş olup, herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Kaynaklar

- [1] R. C. Dugan, *Electrical Power Systems Quality*. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2012.
- [2] "Reducing technical loss in the distribution grid. 201". Retrieved March 25, 2019. [Online] Available: <https://www.gridcure.com/reducing-technical-loss-in-the-distribution-grid/>
- [3] G. Turan, *Electrical Power Transmission System Engineering: Analysis and Design*, 2nd ed, CRC Pres, 2014.
- [4] A. Merlin, H. Back, "Search for a minimum-loss operating spanning tree reconfiguration in an urban power distribution", *Proceedings of the 5th Power System Conference*, Cambridge, U.K., Sept., 1975, DOI: 77A0175768.
- [5] D. Shirmohammadi, H. W. Hong, "Reconfiguration of electric distribution networks for resistive line losses reduction". *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 4, no. 2, pp. 1492-1498, 1989, DOI: 10.1109/61.25637.
- [6] S. Civanlar, J. J. Grainger, H. Yin, S. S. H. Lee, "Distribution feeder reconfiguration for loss reduction", *IEEE Trans.on Power Delivery*, vol. 3, no. 3, pp. 1217-1223, 1988, DOI: 10.1109/61.193906.
- [7] M. E. Baran, F. F. Wu, "Network reconfiguration in distribution systems for loss loss reduction and load balancing", *IEEE Trans.on Power Delivery*, vol. 4, no. 2, pp. 1401-1407, 1989, DOI: 10.1109/61.25627
- [8] S. K. Goswami, S. K. Basu, "A new algorithm for the reconfiguration of distribution feeders for loss minimization". *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 7, no. 3, pp. 1484-1491, 1992, DOI: 10.1109/61.141868
- [9] K. Nara, A. Shiose, M. Kiagawa, T. Ishihara, "Implementation of genetic algorithm for distribution system loss minimum reconfiguration", *IEEE Trans. on Power System*, vol. 7, no. 3, pp. 1044- 1051, 1992, DOI: 10.1109/59.207317
- [10] J. Z. Zhu, "Optimal reconfiguration of electrical distribution network using the refined genetic algorithm". *Electric Power Systems Research*, vol 62, no. 1, pp. 37-42, 2002, DOI: 10.1016/S0378-7796(02)00041-X
- [11] D. I. Duan, X. D. Ling, X. Y. Wu, B. Zhong, "Reconfiguration of distribution network for loss reduction and reliability improvement based on an enhanced genetic algorithm". *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 64, pp. 88-95, 2015, DOI: 10.1016/j.ijepes.2014.07.036
- [12] M. Abdelaziz, "Distribution network reconfiguration using a genetic algorithm with varying population size". *Electric Power Systems Research*, vol. 142, pp. 9-11, 2017.
- [13] D. Das, "Optimal placement of capacitors in radial distribution system using a Fuzzy-GA method". *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 30, no. 6-7, pp. 361-367, 2008, DOI: 10.1016/j.ijepes.2007.08.004
- [14] S. Das, D. Das, A. Patra, "Reconfiguration of distribution networks with optimal placement of distributed generations in the presence of remote voltage controlled bus". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 73, pp. 772-781, 2017, DOI: 10.1016/j.rser.2017.01.055
- [15] V. Jayaraman, A. Ross, "A simulated annealing methodology to distribution network design and management". *European Journal of Operational Research*, vol. 144, no. 3, pp. 629-645, 2003, DOI: 10.1016/S0377-2217(02)00153-4
- [16] H. D. Chiang, R. Jean-Jumeau, "Optimal network reconfigurations in distribution systems. II. Solution algorithms and numerical results". *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 5, no. 3, pp. 1568-1574, 1990, DOI: 10.1109/61.58002
- [17] V. Parada, J. A. Ferland, M. Arias, K. Daniels, "Optimization of electrical distribution feeders using simulated annealing". *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 19, no. 3, pp. 1135-1141, 2004, DOI: 10.1109/TPWRD.2004.829091
- [18] *Elektrik Piyasası Şebeke Yönetmeliği*, Elektrik Piyasası Düzenleme Kurumu, T.C. Resmi Gazete, 25001, 22 Ocak 2003.
- [19] *Enerji Üretimi*, MEGEP, T.C. Milli Eğitim Bakanlığı, Ankara, 2011.
- [20] R. S. Rao, K. Ravindra, K. Satish, S. V. I. Narasimham., "Power loss minimization in distribution system using network reconfiguration in the presence of distributed generation". *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 28, no. 1, pp. 317-325, 2013, DOI: 10.1109/TPWRS.2012.2197227.
- [21] T. T. Nguyen, A. V. Truong, T. A. Phung, "A novel method based on adaptive cuckoo search for optimal network reconfiguration and distributed generation allocation in distribution network", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 78, pp. 801-815, 2016, DOI: 10.1016/j.ijepes.2015.12.030
- [22] J. Kennedy, "Particle swarm optimization", *Encyclopedia of Machine Learning*, pp. 760-766, 2010.
- [23] Y. Del Valle, G. K. Venayagamoorthy, S. Mohagheghi, J. C. Hernandez, R. G. Harley, "Particle swarm optimization: basic concepts, variants and applications in power systems". *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 12(2), 171-195, 2008, DOI: 10.1109/TEVC.2007.896686
- [24] C. Wang, Y. Liu, Y. Zhao, "Application of dynamic neighborhood small population particle swarm optimization for reconfiguration of shipboard power system", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 26(4), 1255-1262, 2013.:
- [25] A. Çakır, "Dağıtım Sistemlerinin PSO Kullanılarak

- Yeniden Yapılandırılması”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Turkey, 2019.
- [26] X. Jin, J. Zhao, Y. Sun, K. Li, B. Zhang. “Distribution network reconfiguration for load balancing using binary particle swarm optimization”. *International Conference on Power System Technology, 2004. PowerCon 2004*, vol. 1, pp. 507-510. IEEE, November, 2004, DOI: 10.1109/ICPST.2004.1460047
- [27] R. D. Zimmerman, C. E. Murillo-Sánchez, D. Gan, "Matpower. PSERC". 1997. [Online] Available: <http://www.pserc.cornell.edu/matpower>.
- [28] A. M. Imran, M. Kowsalya, D. Kothar, “A novel integration technique for optimal network reconfiguration and distributed generation placement in power distribution Networks”. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 63, pp. 461-472, 2014, DOI: 10.1016/j.ijepes.2014.06.011.
- [29] H. Hamour, S. Kamel, H. Abdel-mawgoud, A. Korashy, “Distribution network reconfiguration using grasshopper optimization algorithm for power loss minimization”. *International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST)*, pp. 1-5, IEEE, September, 2018, DOI: 10.1109/SEST.2018.8495659.

Ek A

33 baralı test sistemi hat ve yük değerleri

Hat no	İlk bara	Son bara	Hat parametreleri		Son baradaki yük	
			R (Ω)	X (Ω)	P _L (kW)	Q _L (kVAr)
1	1	2	0.0922	0.0477	100	60
2	2	3	0.4930	0.2511	90	40
3	3	4	0.3660	0.1840	120	80
4	4	5	0.3811	0.1941	60	30
5	5	6	0.8190	0.0700	60	20
6	6	7	0.1872	0.6188	200	100
7	7	8	1.7114	1.2351	200	100
8	8	9	1.0300	0.7400	60	20
9	9	10	1.0400	0.7400	60	20
10	10	11	0.1966	0.0650	45	30
11	11	12	0.3744	0.1238	60	35
12	12	13	1.4680	1.1550	60	35
13	13	14	0.5416	0.7129	120	80
14	14	15	0.5910	0.5260	60	10
15	15	16	0.7463	0.5450	60	20
16	16	17	1.2890	1.7210	60	20
17	17	18	0.7320	0.5740	90	40
18	2	19	0.1640	0.1565	90	40
19	19	20	1.5042	1.3554	90	40
20	20	21	0.4095	0.4784	90	40
21	21	22	0.7089	0.9373	90	40
22	3	23	0.4512	0.3083	90	50
23	23	24	0.8980	0.7091	420	200
24	24	25	0.8960	0.7011	420	200
25	6	26	0.2030	0.1034	60	25
26	26	27	0.2842	0.1447	60	25
27	27	28	1.0590	0.9337	60	20
28	28	29	0.8042	0.7006	120	70
29	29	30	0.5075	0.2585	200	600
30	30	31	0.9744	0.9630	150	70
31	31	32	0.3105	0.3619	210	100
32	32	33	0.3410	0.5302	60	40
33*	21	8	2.0000	2.0000		
34*	9	15	2.0000	2.0000		
35*	12	22	2.0000	2.0000		
36*	18	33	0.5000	0.5000		
37*	25	29	0.5000	0.5000		

*: bağlantı hatları

Ek B

69 baralı test sistemi hat ve yük değerleri

Hat no	İlk bara	Son bara	Hat parametreleri		Son baradaki yük	
			R (Ω)	X (Ω)	P _L (kW)	Q _L (kVAr)
1	1	2	0.0005	0.0012	0	0
2	2	3	0.0005	0.0012	0	0
3	3	4	0.0015	0.0036	0	0
4	4	5	0.0251	0.0294	0	0
5	5	6	0.3660	0.1864	2.6	2.2
6	6	7	0.3811	0.1941	40.4	30
7	7	8	0.0922	0.0470	75	54
8	8	9	0.0493	0.0251	30	22
9	9	10	0.8190	0.2707	28	19
10	10	11	0.1872	0.0619	145	104
11	11	12	0.7114	0.2351	145	104
12	12	13	1.0300	0.3400	8	5
13	13	14	1.0440	0.3450	8	5.5
14	14	15	1.0580	0.3496	0	0
15	15	16	0.1966	0.0650	45.5	30
16	16	17	0.3744	0.1238	60	35
17	17	18	0.0047	0.0016	60	35
18	18	19	0.3276	0.1083	0	0
19	19	20	0.2106	0.0690	1	0.6
20	20	21	0.3416	0.1129	114	81
21	21	22	0.0140	0.0046	5	3.5
22	22	23	0.1591	0.0526	0	0
23	23	24	0.3463	0.1145	28	20
24	24	25	0.7488	0.2475	0	0
25	25	26	0.3089	0.1021	14	10
26	26	27	0.1732	0.0572	14	10
27	3	28	0.0044	0.0108	26	18.6
28	28	29	0.0640	0.1565	26	18.6
29	29	30	0.3978	0.1315	0	0
30	30	31	0.0702	0.0232	0	0
31	31	32	0.3510	0.1160	0	0
32	32	33	0.8390	0.2816	14	10
33	33	34	1.7080	0.5646	9.5	14
34	34	35	1.4740	0.4873	6	4
35	3	36	0.0044	0.0108	26	18.55
36	36	37	0.0640	0.1565	26	18.55
37	37	38	0.1053	0.1230	0	0
38	38	39	0.0304	0.0355	24	17
39	39	40	0.0018	0.0021	24	17
40	40	41	0.7283	0.8509	1.2	1
41	41	42	0.3100	0.3623	0	0
42	42	43	0.0410	0.0478	6	4.3
43	43	44	0.0092	0.0116	0	0

44	44	45	0.1089	0.1373	39.22	26.3
45	45	46	0.0009	0.0012	39.22	26.3
46	46	47	0.0034	0.0084	0	0
47	47	48	0.0851	0.2083	79	56.4
48	48	49	0.2898	0.7091	384.7	274.5
49	49	50	0.0822	0.2011	384.7	274.5
50	50	51	0.0928	0.0473	40.5	28.3
51	51	52	0.3319	0.1114	3.6	2.7
52	52	53	0.1740	0.0886	4.35	3.5
53	53	54	0.2030	0.1034	26.4	19
54	54	55	0.2842	0.1447	24	17.2
55	55	56	0.2813	0.1433	0	0
56	56	57	1.5900	0.5337	0	0
57	57	58	0.7837	0.2630	0	0
58	58	59	0.3042	0.1006	100	72
59	59	60	0.3861	0.1172	0	0
60	60	61	0.5075	0.2585	1244	888
61	61	62	0.0974	0.0496	32	23
62	62	63	0.1450	0.0738	0	0
63	63	64	0.7105	0.3619	227	162
64	64	65	1.0410	0.5302	59	42
65	11	66	0.2012	0.0611	18	13
66	66	67	0.0047	0.0014	18	13
67	12	68	0.7394	0.2444	28	20
68	68	69	0.0047	0.0016	28	20
69*	11	43	0.5000	0.5000		
70*	13	21	0.5000	0.5000		
71*	15	46	1.0000	1.0000		
72*	50	59	2.0000	2.0000		
73*	27	65	1.0000	1.0000		

*: bağlantı hatları



Ses kayıtlarından otomatik keman müzik transkripsiyonu

*Automatic violin music transcription from audio recordings*Kemal Avcı^{1*}, Tamer Şevki Acuner²¹ İzmir Demokrasi Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, kemal.avci@idu.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5040-3594>² Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Bilgisayar Teknolojileri Bölümü, tamer.acuner@beun.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0586-4994>

MAKALE BİLGİLERİ

ÖZ

*Makale Geçmişi:*Geliş 3 Şubat 2023
Revizyon 25 Mart 2023
Kabul 27 Mart 2023
Online 20 Haziran 2023*Anahtar Kelimeler:**Müzik işaret işleme, Otomatik müzik transkripsiyonu, Keman, Başlangıç zamanı tespiti, Matlab, Grafiksel kullanıcı arayüzü*

Bu çalışmada, başlangıç seviyesi keman eğitiminde kullanmak amacıyla keman öğrenenlere çalma performanslarıyla ilgili bir geri dönüt sağlayacak karmaşık spektral fark yöntemi tabanlı bir otomatik müzik transkripsiyon sistemi önerilmiştir. Ayrıca, önerilen müzik transkripsiyon sistemine dayalı ve kemandaki temel etütlerden olan dört boş tel, sol majör arpej ve sol majör dizi notalarını tespit eden Matlab yazılım tabanlı bir kullanıcı arayüzü gerçekleştirilmiştir. Önerilen sistemin performans analizi için iPad tablet tabanlı profesyonel kayıt sistemi kullanarak sekiz katılımcıdan elde edilmiş bir ses kayıt veri seti oluşturulmuştur. Önerilen sistemin keman ses kayıtlarının analizini doğru yapabilmesi için müzik parçasının kendisini oluşturan notalara uygun bölütlenmesi, bunun için de notaların başlangıç zamanının doğru bir şekilde tespit edilmesi gerekmektedir. Piyano ve gitar gibi diğer müzik çalgı seslerine kıyasla, keman sesinin nota başlangıç zamanı tespiti, sahip olduğu zarf karakteristiği nedeniyle daha zordur. Önerilen çalışmada nota başlangıç zamanı tespiti için karmaşık spektral fark yöntemi kullanılmaktadır. Daha sonra, çıkarılan bölütle hızlı Fourier dönüşümü uygulanarak keman sesinin notası ve oktavı belirlenecek şekilde bölütün temel frekansı bulunmaktadır. Ayrıca, geliştirilen arayüz üzerinde süre ve gürültü analizleri de yapılabilmektedir. Kıyaslamalı sonuçlar, önerilen sistemin önemli müzik analiz yazılımları olan MIRtoolbox ve Essentia'daki yöntemlere göre daha başarılı performans sergilediğini göstermektedir.

ARTICLE INFO

ABSTRACT

*Article history:*Received 3 February 2023
Received in revised form 25 March 2023
Accepted 27 March 2023
Available online 20 June 2023*Keywords:**Music signal processing, Automatic music transcription, Violin, Onset detection, Matlab, Graphical user interface*

Doi: 10.24012/dumf.1246822

* Sorumlu Yazar

In this study, an automatic music transcription system based on complex spectral difference method is proposed to provide feedback to violin learners about their playing performance for use in beginner violin education. In addition, a Matlab software-based user interface has been implemented based on the proposed music transcription system and detecting the four open-string, G major arpeggio and G major scale notes, which are ones of the fundamental etudes in violin. For the performance analysis of the proposed system, a sound recording database obtained from eight participants was created using an iPad tablet-based professional recording system. In order for the proposed system to analyze violin sound recordings correctly, the music piece should be segmented according to the notes forming the music piece itself, and for this, the starting times (onsets) of the notes should be determined. Compared to other musical instruments such as piano and guitar, the note onset detection of violin sound is more difficult due to its envelope characteristic. In the proposed study, the complex spectral difference method is used to determine the note onset. Then, by applying the fast Fourier transform to the detected segment, the fundamental frequency of the segment is found so that the note and octave of the violin sound are determined. Moreover, duration and volume analyzes can also be performed on the developed interface. The comparative results showed that the proposed system exhibits better performance than the methods existing in MIRtoolbox and Essentia, which are important music analysis softwares.

Giriş

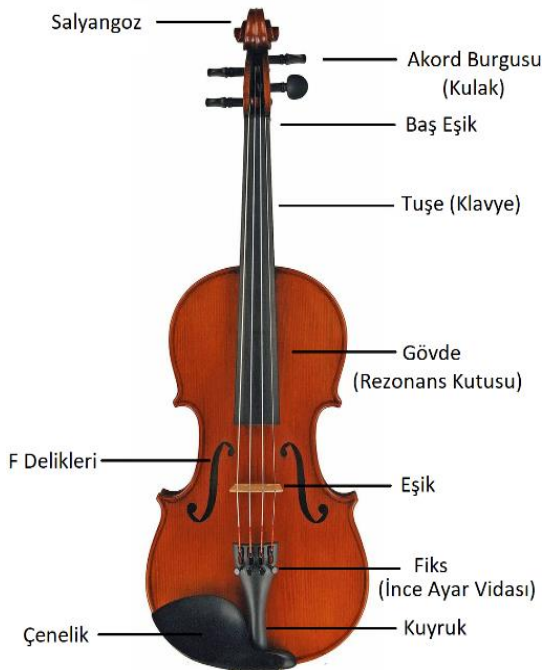
Keman Hakkında Temel Bilgiler

Keman, en tanınmış orkestra çalgısı olup dört telli yaylı bir çalgıdır. Diğer yaylı çalgılar ise viyola, viyolonsel (çello) ve kontrbasır. Bu dört telli yaylı çalgıların fiziksel ebatları ve tellere karşılık gelen notalar farklıdır. Tablo 1'de dört telli yaylı çalgıların boş tellerine karşılık gelen notalar ile çalgıların yaklaşık uzunlukları verilmiştir [1]. Müzik notalarının A (La), B (Si), C (Do), D (Re), E (Mi), F (Fa) ve G (Sol) harfleriyle gösterimi yaygın kullanılan bir nota adlandırma sistemidir. Tablo 1'de belirtilen notalar, kalın sestene ince sese doğru sıralanmış olup, notaların sağ alt tarafındaki rakamlar, oktav numarasını göstermektedir. Örneğin, G3 notası, 3. oktav Sol notasını belirtmektedir.

Tablo 1. Dört telli yaylı çalgıların boş tel notaları ve yaklaşık uzunlukları.

Çalgı	Boş Tel Notaları				Uzunluk (cm)
Keman	G ₃	D ₄	A ₄	E ₅	60
Viyola	C ₃	G ₃	D ₄	A ₄	66
Viyolonsel	C ₂	G ₂	D ₃	A ₃	115
Kontrbas	E ₁	A ₁	D ₂	G ₂	200

Sahip olduğu ses rengi, ses sınırı ve müzikal düşünceleri anlatmadaki ses çeşitliliği nedeniyle pek çok bestecinin en gözde çalgısı olan keman, üzerinde en çok eser yazılan ve çalma tekniği geliştirilen çalgılardan birisidir [2]. Şekil 1'de bir kemanın kısımları görülmektedir.



Şekil 1. Kemanın yapısı.

Kemanın gövde kısmı; akçaağaç, çam, köknar, ladin vb. ağaçlardan yapılmakta olup, üst kapak, alt kapak ve onları birleştiren kasnakta oluşur. Üst kapak üzerinde bulunan f şeklindeki iki adet delik, ses titreşimlerinin dışarı çıkmasını sağlar. Kemanın ses karakteristiğini belirleyen etmenler, keman yapımında kullanılan ağaç ve yapılan ciladır. Akçaağaçtan yapılan keman sapının ucu, görünümünden dolayı salyangoz olarak adlandırılır. Salyangozdan sonra dört tane akort burgusu ve baş eşik yer alır. Burgulara bağlanan teller, sap üzerine yerleştirilmiş siyah renk abanozdan yapılmış bir tuşenin üzerinden gelir ve eşikten geçerek kuyruğa bağlanır. Eşik (veya köprü) telleri yükselterek sap ile kuyruk arasında geçişi sağlarken tellerin titreşimini üst kapağa iletir. Tellerin kuyruğa bağlı olduğu yerlerde fiks (ince ayar vidası) kullanılarak hassas ayar yapılabilir. Keman çalarken konfor sağlayan çenelik, kemana haricen monte edilir. Keman tellerine sürterek ses çıkartan arşe (yay) ise genellikle at kılından imal edilir.

Boş tellerde yukarıdan aşağıya sırasıyla G (Sol), D (Re), A (La) ve E (Mi) notalarına akort edilen kemanda parmak kullanımıyla birlikte daha fazla nota seslendirilebilmektedir. Tablo 2'de tel bazında kemanda bulunan notalar ve bu notalara ait frekanslar gösterilmektedir. Tablo 2'de görüldüğü üzere kemadaki en pes ses 196 Hz frekansa sahip 3. oktav Sol (G₃) notası, en tiz ses ise 987,7 Hz frekansa sahip 5. oktav Si (B₅) notasıdır.

Tablo 2. Kemanda bulunan notalar ve Hz cinsinden frekansları.

1. Tel		2. Tel		3. Tel		4. Tel	
Nota	Frekans	Nota	Frekans	Nota	Frekans	Nota	Frekans
G ₃	196.0	D ₄	293.6	A ₄	440.0	E ₅	659.2
G# ₃	207.6	D# ₄	311.1	A# ₄	466.2	F ₅	698.5
A ₃	220.0	E ₄	329.6	B ₄	493.8	F# ₅	739.9
A# ₃	233.1	F ₄	349.2	C ₅	523.3	G ₅	784.0
B ₃	246.9	F# ₄	369.9	C# ₅	554.3	G# ₅	830.6
C ₄	261.6	G ₄	392.0	D ₅	587.3	A ₅	880.0
C# ₄	277.2	G# ₄	415.3	D# ₅	622.3	A# ₅	932.3
D ₄	293.6	A ₄	440.0	E ₅	659.2	B ₅	987.7

Otomatik Müzik Transkripsiyonu ve Önemi

Duygu ve düşünceleri belli bir amaç ve yöntemle, belirli bir güzellik anlayışına göre birleştirilmiş seslerle işleyip estetik bir bütün olarak anlatan müzik [3]; tüm sanat dalları içinde, insan ruhu üzerinde en derin etkiyi bırakan sanat olarak kabul edilmektedir [4],[5]. İnsanlık tarihinde önemli bir yere sahip olan müziğin [6] insanların entelektüel, sosyal ve kişisel gelişimleri üzerinde olumlu etkileri olması nedeniyle [7], müzik eğitimi her daim insanların amatör veya profesyonel olarak almak istedikleri bir konu olmuştur.

Müzik eğitiminin bir boyutu olan çalgı eğitimi Türkiye'de güzel sanatlar liseleri, konservatuvarlar, üniversitelerin güzel sanatlar eğitimi bölümleri, müzik öğretmenliği anabilim dalları, müzik dershaneleri, özel dersler vb. kurumlar aracılığı ile gerçekleştirilmektedir [8].

Geleneksel hoca-öğrenci çalışmalarındaki kısıtlamalar ve olanaksızlıklardan dolayı çalgı eğitiminde çeşitli zorluklar yaşanmaktadır. Bu nedenle müzik eğitiminde yardımcı unsur olarak çeşitli teknoloji tabanlı sistemler önerilmiştir [9]-[11].

Bu gibi teknolojik sistemler müzik işaret işleme alanında oluşturulan yöntemlerin uygun yazılımlar yardımıyla değişik platformlarda kullanıcının hizmetine sunulmasıyla oluşturulmuşlardır. Bir müzik işaretinin otomatik olarak notaya dökümünü konu alan ve müzik işaret işleme disiplini içerisinde önemli bir yer tutan otomatik müzik transkripsiyon konusu, bu tür sistemlerin temelini ise oluşturmaktadır [12]-[17]. Otomatik müzik transkripsiyonu, bir müzik işaretinin bir sembolik gösterime dönüştürülme işlemidir [18]. Uygulama alanı olarak müzik bilgisinin otomatik çıkarımı, müzikolojik analiz ve interaktif müzik sistemleri verilebilir [19].

Problem Tanımı

Yaylı çalgılar ailesinin en küçük bireyi olan keman, dünyanın birçok yerinde çok sevilen ve oldukça yaygın kullanılan çalgılardan biri olma özelliğini taşımaktadır. Kemanın perdesiz bir çalgı oluşu, yay kullanımı ve keman çalınmada yapılması gereken hareketlerin günlük yaşamda başka hiçbir alanda kullanılmaması, dolayısıyla vücudun bu hareketlere kolay uyum sağlayamaması gibi çeşitli etkenler; kemanı başlangıç aşamasından itibaren öğrenilmesi zor bir çalgıya dönüştürmektedir.

Kemanın öğrenilmesindeki zorluklar nedeniyle, bu çalgının öğrenmesini kolaylaştıracak bir takım yardımcı unsurlara ihtiyaç duyulmaktadır [20]. Bu tür ihtiyaçlara yardımcı olabilecek teknolojik sistemler, otomatik transkripsiyon işlemine dayalıdır. Kemanın ses karakteristiğinin farklı yapısı ve çok farklı keman çalış tekniklerinin bulunması nedeniyle otomatik transkripsiyonun yapılması, diğer enstrümanlara göre daha zordur [13],[21].

Bu çalışmada, başlangıç seviyesi keman öğrencilerinin çalma performansları hakkında geri besleme alabilecekleri bir sistemin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla öğrencilerin boş tel, arpej ve dizi çalışmalarındaki performansları için geri dönüt alabilecekleri bir otomatik müzik transkripsiyon sistemi önerilmiş ve bu önerilen sisteme dayalı Matlab yazılım tabanlı bir kullanıcı arayüz tasarımı gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışma şu bölümlerden oluşmaktadır:

- İkinci bölümde otomatik müzik transkripsiyon ve kullanıcı arayüzleri ile ilgili literatürde yer alan çalışmalar hakkında kısa bilgiler verilmektedir.
- Üçüncü bölümde, önerilen sistemin analizinde kullanılacak olan keman ses kayıtları, sonra literatürde yaygın olarak kullanılan MIRtoolbox ve Essentia müzik analiz yazılımları, bunu takiben ise önerilen otomatik transkripsiyon sistemi ile bu sistem tabanlı gerçekleştirilen kullanıcı arayüz hakkında bilgiler verilmektedir.
- Dördüncü bölümde ise boş tel, arpej ve dizi çalışma kayıtları için önerilen sistemle birlikte MIRtoolbox ve Essentia'dan elde edilen analiz sonuçları verilmektedir.
- Son bölümde, bu çalışmada elde edilen sonuçlar özetlenmekte ve ileride konuyla ilgili yapılabilecek çalışmalar verilmektedir.

Literatür İncelemesi

Ses kayıtlarından otomatik müzik transkripsiyon çalışmaları 1977 yılından itibaren Moorer [22], Piszczalski ve Galler [23] çalışmaları ile başlamış olup, konuyla ilgili geniş incelemeler 2004'te Klapuri [24], 2013'te Benetos vd. [25] ve Tavares vd. [26] ve 2016'da Gowrishankar vd. [27] tarafından yapılmıştır. Literatürde gitar [28], basgitar [29], elektrogitar [30], piyano [31-33], davul [34]-[36], davul zili [37], zil çanları [38], sopele [39], Flamenko müziği [40] ve Hint klasik müziği [41] gibi farklı müzik enstrümanları ve türleri için yapılmış çeşitli otomatik müzik transkripsiyon çalışmaları bulunmaktadır.

Kemanla ilgili literatürde yapılmış çeşitli otomatik transkripsiyon ve sistem gerçekleştirme çalışmaları bulunmaktadır. Bu çalışmalar aşağıda kısaca özetlenmiştir.

Muto ve Tanaka (2002) bir transkripsiyon sistemi önermiş ve bu sistemin performansını piyano, flüt, trampet ve kemanı kapsayan enstrümanlar üzerindeki etkilerini tek enstrüman sesi ve iki enstrüman sesi üzerinde denemişlerdir [42]. Elde edilen sonuçlar, önerilen sistemin tek enstrüman sesleri arasında kemanın, iki enstrüman sesleri arasında ise piyano ve kemanın en düşük doğruluk oranında performans sağladığını göstermiştir. Krishnaswamy ve Smith (2003) ses işaretinin kısa zamanlı Fourier dönüşümü çerçevelerinin örüntü tanıma yaklaşımını kullanarak hangi tel üzerinde hangi notanın çalındığını, yayla mı yoksa parmakla mı çalındığını belirlemeye çalışmışlardır [43]. Charles vd. (2004) ViTool adını verdikleri keman pedagojisi, ses analizi ve başlangıç ile iyi çalıcı kayıtlarının kıyaslanması tabanlı bir keman öğretim yardımcısı geliştirmek için olası bir yaklaşım sunmuşlardır [44]. Yin vd. (2004) keman müziği tabanlı olarak bir kemancının animasyonunu otomatik çıkaran bir sistemin ilk adımını atmışlardır [45]. Bunun için ilk adım olarak giriş ses işaretinin analizini yapıp müzik notalarına dönüştürmeye, daha sonra da bu notaları kullanarak bir kemancının animasyonunu sentezlemeye çalışmışlardır. Yin vd. (2005) başlangıç keman öğrencileri için Digital Violin Tutor (Sayısal Keman Öğreticisi) isminde bir entegre sistem önermişlerdir [46]. Önerilen sistemin kullanıcı arayüzünün sol üst bölümünde öğretmen çalışının videosu, sağ üst bölümde 3 boyutlu avatar animasyonu, sol alt kısımda öğrenci çalışındaki hataların gösterilmesi ve sağ alt bölümde ise 2 boyutlu olarak keman klavyesi animasyonu yer almaktadır. Vogel vd. (2005) piyano ve keman sesleri odaklı çoklu enstrüman müzik transkripsiyonu için dinamik grafiksel bir model sunmuşlardır [47]. Her bir enstrüman zamanda en çok bir nota çalacak şekilde sistem modellenmiştir. Boo vd. (2006) kişisel keman öğrenmeyi desteklemek amacıyla bir ev ortamında kaydedilmiş gerçek zamanlı keman ses işaretlerinin transkripsiyonu için bir yöntem önermiş olup, burada aynı zamanda iki telin yayla çalındığı durumun tespit edilmesi hedeflenmiştir [48]. Burada doğrudan müzikle alakalı bir işaret spektral gösterimi olan yarım-ton bant spektrogramı kullanmıştır. Önerilen sistem nota bölütlenme tespiti ve perde tahmini adında iki ana bloktan oluşmaktadır. Loscos vd. (2006), önceki önerdikleri otomatik keman transkripsiyon sistemini [48] bir adım öte götürmeyi amaçladıkları bu çalışmada, transkripsiyon tekniklerine, yardımcı olma ve hesaplama maliyetini azaltma için düşük seviyeli tanımlayıcı seti sunmuşlardır [49].

Önerilen sistem için nota seviyesinde bölütlenme, perde tahmini ve vibrato analizi konuları çalışılmıştır. Charles vd. (2006) bu çalışmalarında tını uzayında en iyi keman sesini tanımlayan öznelikleri bulmak için işaret işleme yöntemlerinin kullanımı incelemiştir [50]. Tını kalitesini tanımlamak için 6 öznelikli verimliliği ve kullanılabilirliği göz önünde bulundurulmuştur. Wang vd. (2007) ses ve video tabanlı bir keman transkripsiyon sistemi önermişlerdir [51]. Sistemde sağ el yay çekme ve sol el klavye üzerinde parmak hareketlerinin izlenmesi için iki kamera kullanılmıştır. Thornburg vd. (2007), monofonik müzikal ses işaretleri için segmentasyon ve melodi çıkarma işlemleri için olasılıklı bir yöntem önermiş ve piyano ile keman sesleri için uygulama yapmıştır [52]. Yöntem kısa zamanlı Fourier dönüşüm tepeleri üzerine çalışmaktadır. Zhang vd. (2007) sadece ses tabanlı keman transkripsiyonunda ortaya çıkan zorlukları dengelemek için keman parmak kullanımının görsel analizini incelemiştir [53]. Lu vd. (2008) bir bilgisayar, bir mikrofon ve iki web kamera tabanlı bir işitsel-görsel sistemi C++ ortamında gerçekleştirmiştir [54]. Bu sisteme iDVT (interactive Digital Violin Tutor) adını vermişlerdir. Charles vd. (2008), bir bilgisayar sisteminin keman çalma kalitesini değerlendirebilmesine yardımcı olabilecek uygun öznelikler aranmış ve çalınan keman ses örneklerinin kalitesi başlangıç ve profesyonel olarak sınıflandırılmıştır [55]. Bunu yapmakla nesnel ve kararlı bir sınıflama yöntemi sağlama amaçlanmıştır. Maezawa vd. (2009) bir kemanda yayla çalınan tellerin sırasının tahmini için ses tabanlı bir sınıflama yöntemi ve üç hata düzeltme algoritması sunmuşlardır [56]. Barbancho vd. (2009) keman perde ve süre bilgileri dışında vibrato, pizzicato ve tremolo gibi çalım tekniklerinin de tanımlandığı bir müzik transkripsiyon sistemi önermişlerdir [57]. Maezawa vd. (2012), keman ses kayıtlarının analiz edilmesi ile otomatik parmak transkripsiyonu için bir yöntem sunmuşlardır [58]. Bunun için tel numarası ve tel boyunca basılan yerin belirlenmesi çalışması yapılmıştır. Huang (2008) otomatik keman çalan bir çalıcının gerçekleştirilmesi için incelemeler yapmış [59] ve Huang vd. (2012) bu sistemi gerçekleştirmişlerdir [60]. Carillo vd. (2012) bir kemancı tarafından gerçekleştirilen eylemler ile bu eylemlerin ürettiği ses arasındaki ilişkiyi modellemeyi amaçlamışlardır [61]. Bunun için sinir ağları tabanlı bir keman tını modeli önermişlerdir. Wang vd. (2012), özel olarak perde doğruluğu üzerine çalışan keman öğrenenleri hedeflemişlerdir [62]. Bunun için çalınan perdeyi tespit edecek bir perde takip algoritması uygulamışlardır. Sonuçta doğru perdenin çalınıp çalınmadığı bilgisi kullanıcılara gerçek zamanlı olarak sağlanmıştır. Ayrıca öğretim materyali olarak majör dizi ve arpej skorları da sistem tarafından kullanıcılara sunulmakta, bunun yanı sıra seviyelerine bağlı olarak farklı tempolarda pratik yapma olanağı sunulmaktadır. Lin vd. (2014), solo keman kayıtlarında sunulan her bir notanın zaman-bağımlı analizi için çerçeve tabanlı özyinelemeli düzenlilik yöntemi önermişlerdir [63]. Bu yöntem negatif olmayan matris ayrıştırma yöntemine benzer olarak Fourier büyüklük katsayılarından oluşmuş matrisi taslak-matris ve şiddet-matrisine ayrıştırarak yapmaktadır. Pardue vd. (2015), kemanda performans takibi için düşük maliyetli ve gerçek zamanlı bir yöntem önermişlerdir [64]. Hem tel üzerinde yay takibi hem de klavye üzerinde parmak takibi için ayrı ayrı sensörler kullanılmıştır. Jo vd. (2015), insanın keman çalma tekniklerini taklit eden keman çalan bir robot önermişlerdir

[65]. Liang vd. (2015), nota başlangıç zamanı kadar literatürde fazla üzerinde durulmayan nota bitiş zamanının tespiti konusunu ele almışlardır [66]. Jo vd. (2016) bir robot tarafından çalınan kemandan üretilen sesleri değerlendiren işitsel geri besleme sistemi geliştirilmesi konusu ele alınmış, yay hızı ve yay basıncı tahmin edilmeye çalışılmıştır [67]. Maruyama ve Uemura (2017), yay mekanizması ve yay kaydırma mekanizmasını barındıran ve ses kontrol ile çalışan bir keman çalan robot geliştirmişlerdir [68]. Yura vd. (2017), Matlab Simulink tabanlı keman çalan bir robot kol modellemesi üzerinde durmuşlardır [69]. Li vd. (2017), polifonik müzikte vibrato tespiti ve analizi için video tabanlı bir yaklaşım önermişlerdir [70]. Sonuç olarak yüksek polifoni durumları için önerilen video tabanlı yöntemin ses tabanlı yöntemlerden daha doğru bir şekilde vibrato tespiti yaptığı gözlemlenmiştir. Pardue ve McPherson (2019), kemanda entonasyonu geliştirmek için işitsel ve görsel geribeslemeli bir sistem önermişlerdir [71]. Ortega vd. (2019), keman performansında ifade modelleme üzerinde bir yaklaşım önermişlerdir [72].

Bu çalışmada, literatürden farklı olarak başlangıç seviyesi keman öğrencilerinin boş tel, arpej ve dizi çalışmalarındaki performansları için geri besleme alabilecekleri bir arayüz tasarımının gerçekleştirilmesi amaçlanmış, bu doğrultuda keman seslerinin doğru otomatik transkripsiyonun yapılması hedeflenmiştir.

Materyal ve Yöntem

Bu bölümde çalışmada kullanılan keman ses kayıtları, önemli müzik analiz yazılımları olan MIRtoolbox ve Essentia ile önerilen sisteminin gerçekleştirilmesi hakkında bilgiler verilmektedir.

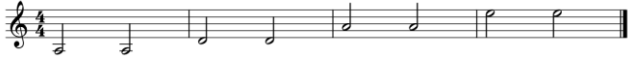
Keman Ses Kayıtları

Hedeflenen etütler için literatürde uygun veri seti olmadığından, öncelikle çalışmada kullanılacak kayıt verisi oluşturulmuştur. Müzik Eğitimi Anabilim Dalında öğretim elemanı olarak çalışan dört yaylı çalgılar eğitimcisi ve yaylı çalgılar eğitimi alan dört lisans öğrencisi, Şekil 2'de gösterilen bir yaylı çalgılar eğitimcisine ait kemanı kullanarak boş tel, sol major arpej ve sol major dizi çalışmalarını çalışmışlardır.



Şekil 2. Kayıt çalışmalarında kullanılan keman.

İlk etüt çalışması olarak sessiz bir ortamda Şekil 3'te verilen boş tel çalışması çalınmış, bu çalıda çalıcılar keman üzerindeki dört boş teli yukarıdan aşağıya doğru her bir teli sırasıyla çekerek ve iterek toplamda 8 notayı çalmışlardır.



Şekil 3. Boş tel çalışması.

İkinci etüt çalışması olarak Şekil 4'te verilen Sol majör tonuna ait iki oktavlık çıkıcı ve inici arpejine ait toplamda 14 nota çalınmıştır.



Şekil 4. Sol majör arpej çalışması.

Son etüt çalışması olarak Şekil 5'te verilen Sol majör tonuna ait iki oktavlık çıkıcı ve inici dizisine toplamda 30 nota çalınmıştır.



Şekil 5. Sol majör dizi çalışması.

Keman çalgı tekniğinin gelişmesi açısından majör dizi çalışmalarının yapılmasının önem taşıdığı literatürde belirtilmiştir [73]. Belirtilen üç etüdün keman çalıcıları tarafından, bütün yaylarda (tüm kıl), forte (kuvvetli) gürükte ve 45 metronom hızında çalmaları istenilmiştir. Bununla birlikte ayrıca Sol majör tonuna ait iki oktavlık çıkıcı ve inici dizinin ve arpejlerinin hiçbir müziksel dinamik (piyano, forte, diminiendo, ritardando, crescendo, de crescendo vb.) ve vibrato yapmaksızın çalınması ve kayıt altına alınması sağlanmıştır. Her çalma işleminden sonra kemanın akordu tekrar kontrol edilmiştir. Oluşturulan keman sesleri, Şekil 6'da verilen iPad tablet bilgisayar tabanlı iTrack Dock Studio kayıt sistemi ile profesyonel anlamda stüdyo kalitesinde (24 bit ve 48 KHz örnekleme oranları, 105 dB dinamik aralık) kayıt yapılarak bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Bu şekilde, sistem performansında kullanılacak “.m4a” uzantılı keman ses kayıt dosyaları elde edilmiştir. Bu çalışmada elde edilen tüm kayıtların analizi lisanslı 64 bit Matlab 2016a programı kullanılarak yapılmıştır.



Şekil 6. iTrack Dock studio kayıt sistemi.

Ses analiz yazılımları: MIRtoolbox ve Essentia

Bu çalışmada önerilen sistemin keman ses kayıtlarının otomatik transkripsiyonundaki performansı, literatürdeki MIRtoolbox ve Essentia isimli iki yazılımda bulunan ilgili yöntemlerle kıyaslanarak yapılmıştır.

MIRtoolbox, ses kayıtlarından müzik bilgisi almak için kullanılan ve Olivier Lartillot ve Petri Toiviainen tarafından 2007 yılında yayınlanmış ve sürekli geliştirilmekte olan bir Matlab araç kutusudur [74]. Bu çalışmada MIRtoolbox'ın güncel sürümü olan 1.7 sürümü kullanılmıştır.

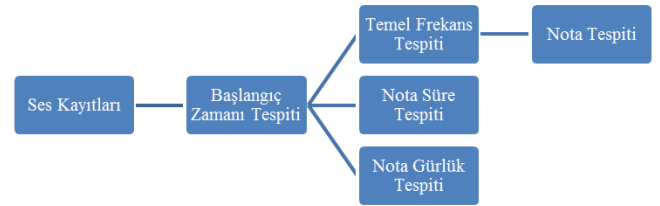
Essentia ise, İspanya'nın Barcelona şehrindeki Pompeu Fabra Üniversitesi bünyesinde bulunan Music Technology Group (MTG) tarafından 2013 yılında yayınlanan ses tabanlı müzik bilgisi alma ve ses analizi için kullanılan açık kaynaklı bir C++ kütüphanesidir [75]. Bu çalışmada güncel sürüm olan 2.1 beta3 kullanılmıştır.

Önerilen Otomatik Transkripsiyon Sistemi ve Kullanıcı Arayüz Gerçekleştirilmesi

Bu kısımda öncelikle keman seslerinin otomatik analizlerini yapacak olan önerilen transkripsiyon sistemi ve sonrasında bu sisteme dayalı olarak gerçekleştirilen kullanıcı arayüzü verilmiştir.

Önerilen Otomatik Transkripsiyon Sistemi

Boş tel, arpej ve dizi çalışmalarına ait ses kayıtlarının analizi için oluşturulan otomatik transkripsiyon sistemin blok diyagramı Şekil 7'de verilmiştir.



Şekil 7. Önerilen otomatik transkripsiyon sistemi blok diyagramı.

Başlangıç zamanı tespiti

Ses kayıtlarından nota yerlerinin tespiti için öncelikle nota başlangıç zamanlarının tespiti yapılması gerekmektedir. Literatürde nota başlangıç zamanı tespiti için çeşitli yöntemler bulunmaktadır [13], [76]. Tarafımızca yapılan analizler sonucu daha iyi sonuçlar vermesi nedeniyle bu çalışmada nota başlangıç zamanlarının tespiti için karmaşık spektral fark yöntemi [76] kullanılmıştır. Başlangıç zamanı tespiti için aşağıdaki işlem basamakları yapılmıştır.

(i) Karmaşık spektral fark yönteminden tespit fonksiyonun elde edilmesi: $s(n)$ ayrık zamanlı işaretin kısa zamanlı Fourier dönüşümü (STFT) Eş. (1)'deki gibi tanımlandığında, başlangıç zamanı tespitinde kullanılacak fonksiyon (δS) Eş. (2)'de belirtilen şekilde spektral farktan bulunur [75].

$$S_k(m) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} s(n)w(mh - n)e^{-j2\pi nk/N} \quad (1)$$

$$\delta S = \sum_{k=1}^N |S_k(m)| - |S_k(m-1)| \quad (2)$$

Burada $w(n)$ N-uzunluklu ayırık zamanlı pencere ve h ardışık pencereler arasındaki zaman kayması olup, bu çalışmada %50 örtüşme oranı ve 20 ms uzunluğunda Hamming penceresi kullanılmıştır. Tespit fonksiyonu (δS) için kemanda çalınan notaların bulunabileceği 190 Hz-995 Hz frekans aralığı kullanılmıştır.

(ii) *Tespit fonksiyonundan başlangıç zamanlarının elde edilmesi:* δS tespit fonksiyonu; boş tel, arpej ve dizi çalışmalarında bulunan nota sayısına göre bantlara bölünmüştür. Boş tel çalışmasında 8, arpej çalışmasında 14 ve dizi çalışmasında 30 nota seslendirilmiştir. Sonraki işlemde bantlar içerisinde yer alan en büyük genlik değerlerine karşılık gelen parça numarası (p_m) bulunur. Bulunan bu parça numaraları, örtüşme oranı ($n_{ort}=\%50$), pencere uzunluğu ($N=20$ ms) ve örnekleme frekansı ($f_s = 48.000$ Hz) kullanılarak Eş. (3)'de verilen işlem sonucu saniye cinsinden başlangıç zamanları bulunur.

$$\text{Başlangıç zamanları} = (p_m). (n_{ortusme}). (N). (f_s) \quad (3)$$

Temel frekans tespiti

Nota başlangıç zamanlarının tespit edilmesiyle notaların parça içerisindeki yerleri belirlenmiş olur. Sonraki aşamada Hızlı Fourier Dönüşümü ile her bir notanın spektrumu bulunmaktadır. Adaptif eşik ve segmentasyon yöntemi, bulunan spektrumuna uygulanır ve sonuçta harmoniklerden ayırt edilmek suretiyle notanın temel frekansı tespit edilir. Temel frekans tespiti için şu aşamalar kullanılmıştır:

(i) *Parçanın notalara bölünmesi:* Başlangıç zamanlarının tespit edilmesiyle kayıt içerisindeki notalar ayrıştırılır. Boş tel çalışmasında 8, arpej çalışmasında 14 ve dizi çalışmasında 30 nota elde edilir.

(ii) *Notaların spektrumlarının bulunması:* Elde edilen her bir notanın Hızlı Fourier Dönüşümü alınarak genlik spektrumu bulunur.

(iii) *Her nota için eşik değerlerinin belirlenmesi:* Başlangıç eşik değeri 1 Hz ve ideal nota frekans değerleri ile arasındaki fark belirlenecek bir maksimum değer olarak eşik değeri tespit edilir.

(iv) *Temel frekansın bulunması:* Belirtilen eşik değeri geçen genlik değerleri 1, geçmeyenler sıfır olarak atanır. Eşik değeri ilk geçmiş (yani ilk sıfır olmayan) genlikten itibaren eşik değeri geçmiş ve geçmemiş genlik değerleri arasında maksimum genliğe sahip değerin ve bu maksimum değerinin o toplam veri içerisinde kaçınıcı sırada yer aldığı bulunur. Bulunan bu sıra kullanarak frekans bandından eşik değeri geçmiş notanın ilk temel frekansı bulunur.

Nota tespiti

Tablo 3, Tablo 4 ve Tablo 5'te sırasıyla boş tel, sol majör arpej ve sol majör dizi notalarının hangi telde buldukları ile bunların isimleri ve ideal frekans değerleri bulunmaktadır. Tablodaki teller üstten aşağıya doğru sıralanmıştır. Yani, 1. tel kemanda en üst, 4. tel ise en alt tele karşılık gelmektedir. Keman kayıtlarından bulunacak temel frekansların, bu ideal frekanslara olan yakınlığı tespit edilerek ses kaydındaki notalar tespit edilmektedir.

Tablo 3. Keman boş tel nota ve frekans değerleri.

Tel No	Nota	Frekans (Hz)
1. Tel	G ₃	196.0
2. Tel	D ₄	293.7
3. Tel	A ₄	440.0
4. Tel	E ₅	659.3

Tablo 4. Keman sol majör arpej nota ve frekans değerleri.

Tel No	Nota	Frekans (Hz)
1. Tel	G ₃	196.0
1. Tel	B ₃	246.9
2. Tel	D ₄	293.7
2. Tel	G ₄	392.0
3. Tel	B ₄	493.9
3. Tel	D ₅	587.3
4. Tel	G ₅	784.0

Tablo 5. Keman sol majör dizi nota ve frekans değerleri.

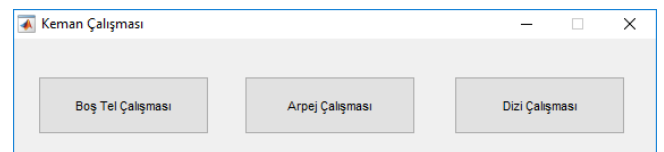
Tel No	Nota	Frekans (Hz)
1. Tel	G ₃	196.0
1. Tel	A ₃	220.0
1. Tel	B ₃	246.9
1. Tel	C ₄	261.6
2. Tel	D ₄	293.7
2. Tel	E ₄	329.6
2. Tel	F# ₄	370.0
2. Tel	G ₄	392.0
3. Tel	A ₄	440.0
3. Tel	B ₄	493.9
3. Tel	C ₅	523.3
3. Tel	D ₅	587.3
4. Tel	E ₅	659.3
4. Tel	F# ₅	740.0
4. Tel	G ₅	784.0

Süre ve gürlük tespitleri

Nota başlangıç zamanları tespit edildikten sonra notaların başlangıç ve bitiş zamanları arasındaki fark nota süresi olarak alınmıştır. Gürlük analizi için ise her bir notanın seslendirilen süre içerisindeki tüm değerlerin mutlak değerinin ortalaması alınmıştır.

Önerilen Kullanıcı Arayüzü

Önerilen otomatik transkripsiyon işlemlerini yapmak üzere Matlab 2016a programı kullanarak Şekil 8'de verilen bir kullanıcı arayüz tasarlanmıştır. Bu arayüzün ayrıntılı yapısı, ileriki kısımlarda yapılacak örnek uygulamalarda verilecektir.



Şekil 8. Önerilen otomatik transkripsiyon için hazırlanmış grafiksel kullanıcı arayüzü.

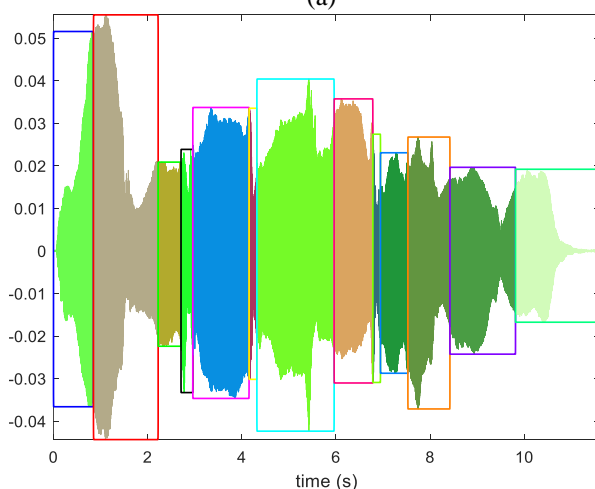
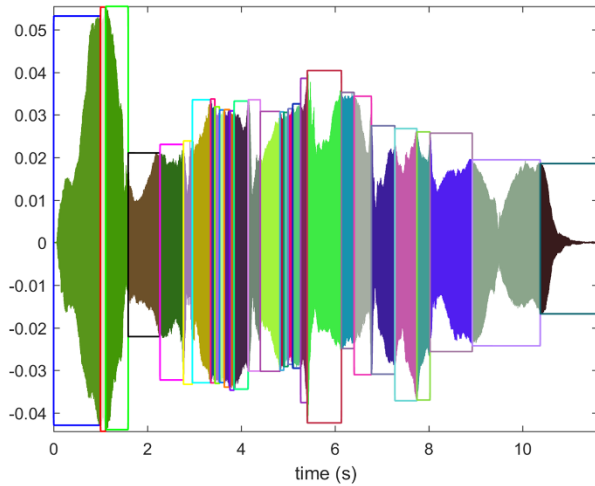
Bulgular ve Tartışma

Bu bölümde sekiz katılımcıya ait boş tel, sol majör arpej ve sol majör dizi çalma kayıtları için literatürdeki önemli müzik analiz araçları olan MIRtoolbox ve Essentia ile önerilen yönteme ait analiz sonuçları verilmektedir.

Bu bölümün ilk kısmında analizler için kullanılan veri setinin dalga grafikleri verilmektedir. İkinci kısımda Matlab'ta MIRtoolbox kullanarak elde edilen analiz sonuçları verilmektedir. Üçüncü kısımda ise Essentia kütüphanesi kullanılarak aynı veri seti analiz edilmiştir. Son kısımda ise gerçekleştirilen arayüz kullanarak aynı veri seti analiz edilmiştir.

MIRtoolbox Tabanlı Analizler

MIRtoolbox 1.7 sürümünde atak faz kullanımsız ve atak faz kullanımlı olmak üzere iki adet bölütleme yöntemi bulunmaktadır. Şekil 9.a ve 9.b birinci katılımcıya ait boş tel çalışma kaydı için sırasıyla atak faz kullanımsız ve atak faz kullanımlı yöntemlere ait bölütleme sonuçlarını vermektedir. Atak faz kullanımsız sonucu elde etmek için Matlab'ta `>> o = mironsets('dosya adı');` `mirsegment(o)`, atak faz kullanımlı sonucu elde etmek için ise `>> o = mironsets('dosya adı');` `'Attacks'; mirsegment(o)` komutları kullanılmıştır.



Şekil 9. Birinci katılımcı boş tel çalmasına ait ses dalgasının MIRtoolbox tabanlı nota bölütlenmesi a) atak faz kullanımsız b) atak faz kullanımlı.

Şekil 9'daki sonuçlardan görüleceği üzere, keman kaydının nota bölütlenmesi MIRtoolbox'ta başarısız bir şekilde sonuçlanmıştır, çünkü boş tel kaydında sadece 8 başlangıç zamanı ve 8 nota olmasına rağmen, atak faz kullanımsız yöntemde 28 başlangıç zamanı ve 28 nota, atak faz kullanımlı yöntemde ise 16 başlangıç zamanı ve 16 nota bulunmuştur. Nota bölütlenmesi hatalı olduğu için ilgili kaydın frekans analizi yapılmamıştır.

Şekil 9'dan elde edilen boş tel çalışmasına ait sonuçlarla birlikte birinci katılımcıya ait sol majör arpej ve dizi çalışmasına ait analiz sonuçları Tablo 6'da verilmiştir. Sonuçlar atak faz kullanımlı yöntemin daha iyi sonuçlar vermesine rağmen her iki yöntemin gerçek değerlerden oldukça fazla sayıda bölütleme yaptığı görülmektedir. Sayfa sınırlamasından dolayı diğer katılımcılara ait sonuçlara burada yer verilememiş, fakat benzer başarısız sonuçlar diğer katılımcı kayıtları için de elde edildiği görülmüştür.

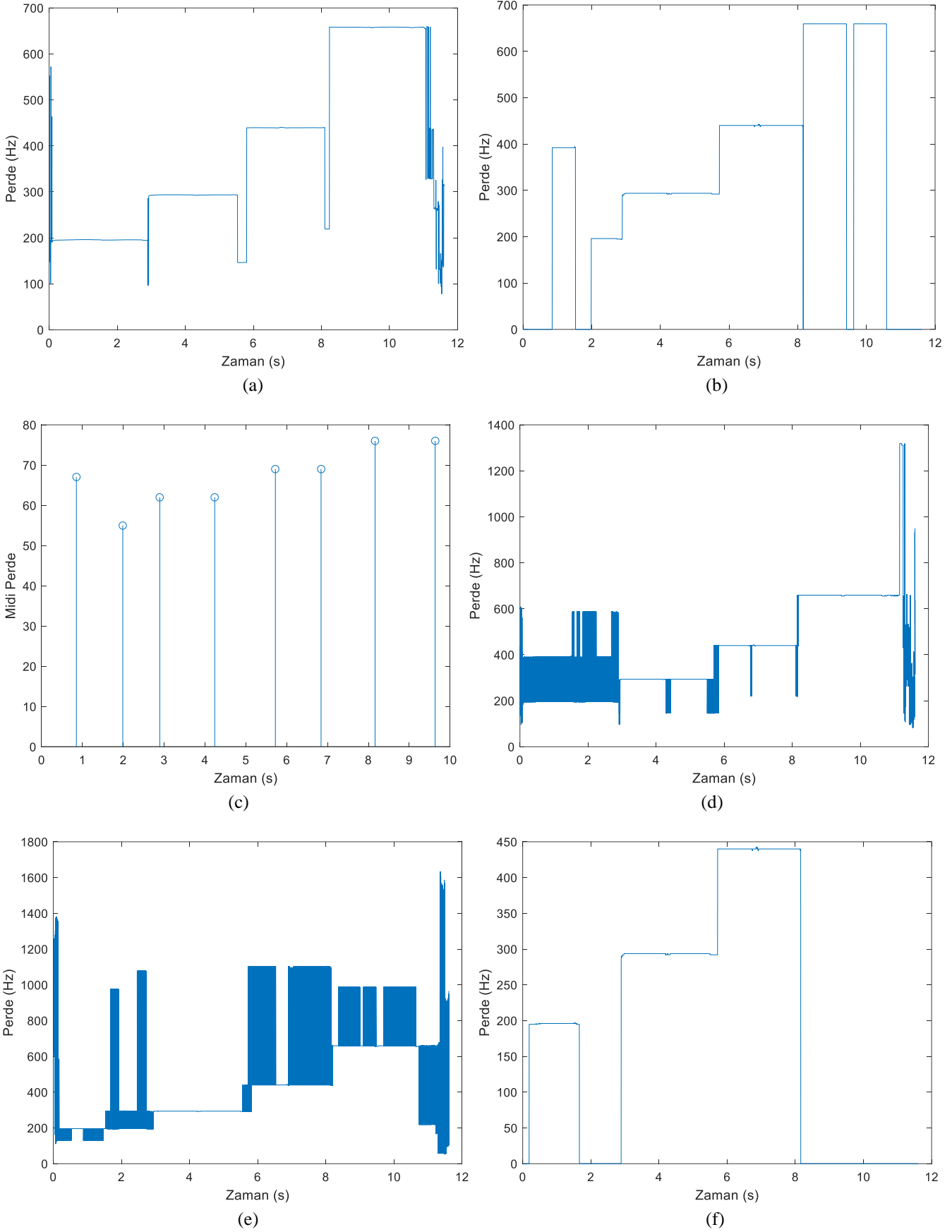
Tablo 6. Birinci katılımcıya ait çalmalar için MIRtoolbox nota bölütleme analiz sonuçları.

Kayıt	Nota sayısı	Atak faz kullanımsız	Atak faz kullanımlı
Boş tel	8	28	16
Arpej	14	40	22
Dizi	30	70	40

Essentia Tabanlı Analizler

Essentia kütüphanesinde tanımlı 6 bölütleme yöntemi bulunmaktadır [77]. Bu yöntemler Yin FFT monofonik perde tahmini (Essentia-I) [78], Melodia monofonik perde tahmini yöntemi (Essentia-II) [79], Monofonik perde tahmini (Essentia-III) [77], Klapuri çoklu perde tahmini yöntemi (Essentia-IV) [80], Melodia çoklu perde tahmini yöntemi (Essentia-V) [79] ve Melodia predominant perde tahmini (Essentia-VI) [79] yöntemleridir. Şekil 10 birinci katılımcıya ait boş tel çalışma kaydı için bu altı yönteme ait bölütleme sonuçlarını vermektedir.

Şekil 10.a'da verilen Yin FFT monofonik perde tahmini yöntemi tabanlı nota bölütlenmesi sonucu, gerçekte 8 adet olan parçadaki nota sayısı 4 olarak bulunmuş ve ayrıca parçanın başında ve sonunda oldukça fazla salınım ortaya çıkmıştır. Şekil 10.b'de verilen Melodia monofonik perde tahmini yöntemi tabanlı nota bölütlenmesi sonucu, parçadaki nota sayısı 6 olarak bulunmuş ve ayrıca nota süreleri çok farklı bir şekilde tespit edilmiştir. Şekil 10.c'de verilen Monofonik perde tahmini yöntemi tabanlı nota bölütlenmesi sonucu, parçadaki nota sayısı 8 olarak doğru bulunmuş, ama ilk notanın midi perde sayısı yanlış bulunmuştur. Bunun yanı sıra nota süreleri eşit çalınmasına rağmen notalar arası süreler eşit bulunmamıştır. Şekil 10.d'de verilen Klapuri çoklu perde tahmini yöntemi tabanlı nota bölütlenmesi sonucu, parçadaki nota sayısını çok farklı sayıda bulmuş, bunun yanı sıra özellikle ilk nota ve parçanın sonunda çok fazla salınım ortaya çıkmıştır. Şekil 10.e'de verilen Melodia çoklu perde tahmini yöntemi tabanlı nota bölütlenmesi sonucu, parçadaki nota sayısını çok farklı sayıda bulunmuş, bunun yanı sıra parçanın birçok bölümünde çok fazla salınım ortaya çıkmıştır. Şekil 10.f'de verilen Melodia predominant perde tahmini yöntemi tabanlı nota bölütlenmesi sonucu, parçadaki nota sayısını 3 olarak bulunmuş, bunun yanı sıra son iki nota hiçbir şekilde tespit edilememiştir.



Şekil 10. Birinci katılımcı boş tel çalmasına ait kaydın Essentia tabanlı nota bölütlenmesi a) Yin FFT, b) Melodia monofonik perde tahmini, c) monofonik nota transkripsiyon, d) Klapuri çoklu perde tahmini, e) Melodia çoklu perde tahmini ve f) Melodia predominant perde tahmini.

Şekil 10'dan elde edilen boş tel çalışmasına ait sonuçlarla birlikte birinci katılımcıya ait sol majör arpej ve dizi çalışmasına ait analiz sonuçları Tablo 7'de verilmiştir. Sonuçlar yer yer bazı yöntemlerin doğru nota sayısını tespit etmekle birlikte, tüm yöntemlerin bölütlemeye birtakım

hatalar verdiğini göstermektedir. Sayfa sınırlamasından dolayı diğer katılımcılara ait sonuçlara burada yer verilememiş, fakat benzer başarısız sonuçlar diğer katılımcı kayıtları için de elde edildiği görülmüştür.

Tablo 7. Birinci katılımcıya ait çalmalar için Essentia nota bölütleme analiz sonuçları.

Kayıt	Essentia I	Essentia II	Essentia III	Essentia IV	Essentia V	Essentia VI
Boş Tel (8 Nota)	- 4 nota tespiti - Başında ve sonunda çok fazla salınım	- 6 nota tespiti - Çok farklı nota süreleri	- 8 nota tespiti - Yanlış ilk nota midisi ve farklı nota süreleri	- Çok fazla nota tespiti - Başında ve sonunda çok fazla salınım	- Çok fazla nota tespiti - Birçok kısımda çok fazla salınım	- 3 nota tespiti - Son iki notanın tespit edilememesi
Arpej (14 Nota)	- Çok fazla nota tespiti - Başında çok fazla salınım	- 15 nota tespiti - Atlanan sus işareti ve yanlış tespit edilen ortadaki notalar	- 14 nota tespiti - Sus işareti yerine yanlışlıkla tespit edilen başka bir nota	- Çok fazla nota tespiti - Parça içerisinde çok fazla salınım	- Çok fazla nota tespiti - Parça içerisinde çok fazla salınım	- 11 nota tespiti - Bir adet sus yerine bulunan iki adet sus
Dizi (30 Nota)	- 30 nota tespiti - Başında ve sonunda fazla salınım, kısa süreli sus işareti	- 30 nota tespiti - Az süreli son iki nota, bazı nota aralarında kısa süreli sus işaretleri	- 32 nota tespiti - Nota süreleri bazı notalar	- Çok fazla nota tespiti - Orta kısım hariç parça içerisinde çok fazla salınım	- Çok fazla nota tespiti - Birçok yanlış nota tespiti, çok fazla salınım	- 18 nota tespiti - Çok fazla sus işareti tespiti

Önerilen Kullanıcı Arayüz Sistemi Tabanlı Analizler

Bu kısımda önerilen kullanıcı arayüz kullanarak keman boş tel, sol majör arpej ve sol majör dizi kayıtlarının notalara nasıl bölümlendiği sadece birinci katılımcıya ait kayıt üzerinden anlatılmakta, daha sonra da tüm kayıtlarla ilgili sonuçlar tablo halinde verilmektedir.

Boş tel çalma kaydı için analiz sonuçları

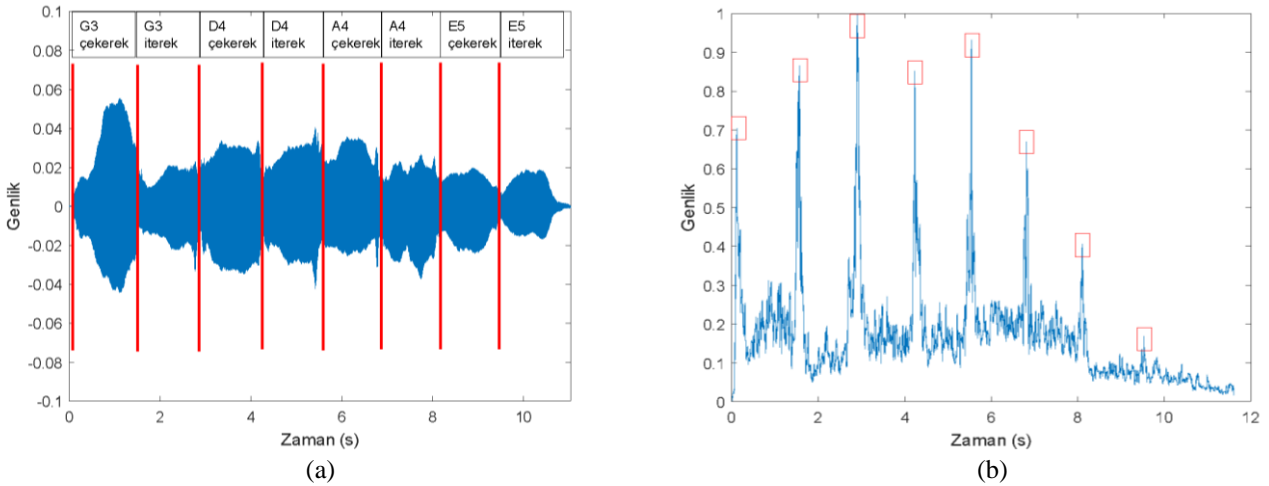
Şekil 11.a'da birinci katılımcıya ait boş tel kayıt örneğinin dalga grafiği ile burada yer alan notaların başlangıç zamanları görülmektedir. Oluşturulan sistemin ilk basamağı, nota başlangıç zamanlarının tespit edilmesidir. Böylelikle kayıt içerisindeki her bir notanın yeri belirlenmiş olup, ilgili analiz için uygun temel bilgi elde edilmiştir. Bu çalışmada notalar arası duraksama olmadığından, bir notanın başlangıç zamanı, önceki notanın bitiş zamanı olarak değerlendirilmiştir. Şekil 11.a'daki grafikte, dikey kırmızı renkli çizgiler nota başlangıç zamanlarını göstermekte olup, bu dalga formunda sekiz notanın var olduğu açıkça görülebilmektedir. Şekil 11.a'da belirtilen nota başlangıç zamanlarını bulma işlemi otomatik olarak yapmak üzere karmaşık spektral fark yöntemi kullanılmıştır. Elde edilen benzeşim sonucu Şekil 11.b'de verilmiştir. Burada tepe noktalara karşılık gelen yatay eksendeki değerler nota başlangıç değerlerini oluşturmaktadır. Oluşturulan sistemin

ikinci aşaması, kayıt içerisinden çekilen notanın temel frekansının adaptif eşik ve segmentasyon işlemleri kullanarak bulunmasıdır.

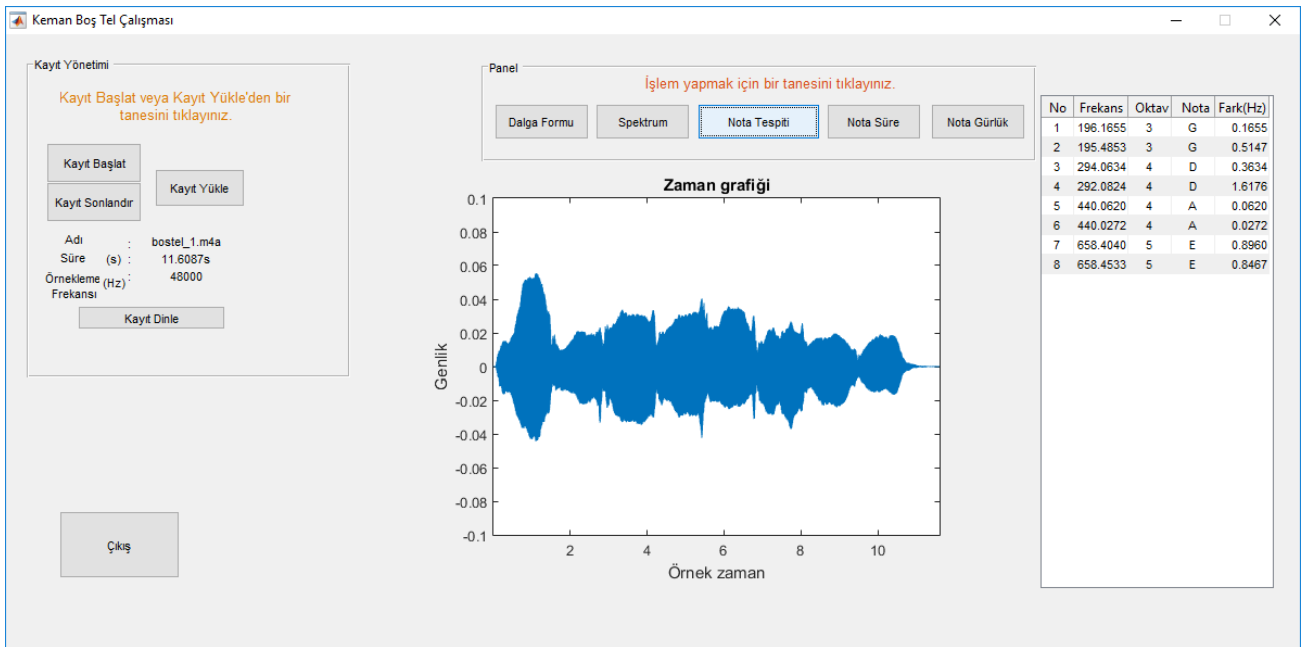
Tüm bu işlemleri otomatik olarak yapmak için hazırlanan arayüz Şekil 12'da görülmektedir. Bu arayüz, Şekil 8'de verilen arayüzde 'Boş Tel Çalışması' butonu tıklandığında çıkmaktadır. Arayüzde bulunan kayıt yönetiminden birinci kişiye ait ses kaydı arayüze yüklenerek ve panel bölümünden "Nota Tespiti" seçildiğinde ilgili kayıttaki notaların oktav ve nota isimleri ile ideal frekans değerlerinden ne kadar fark ile çalıştığı gösterilmektedir (Şekil 12).

Birinci kayıt dışındaki diğer kayıtlar için de nota tespiti yapmak için sistem çalıştırıldığında Tablo 8'de belirtilen sonuçlara ulaşılmıştır. Sonuçlara bakıldığında en yüksek fark değerinin yedinci kayıta ait çekerek çalınan E5 notasında olduğu görülmektedir. Benzer şekilde fark değerlerine bakarak hangi kaydın hangi notasında ne kadar bir fark olduğu, dolayısıyla katılımcıların frekans anlamında performansları görülebilir.

Frekans analizi dışında, arayüzün panel kısmında "Nota Süre" seçildiğinde Şekil 13'te verildiği gibi sekiz notanın saniye cinsinden ne kadar sürede çalındıkları da bulunabilmektedir. Benzer şekilde panel kısmında "Nota Gürlük" seçildiğinde sekiz notanın ne kadar genlikle çalındıkları da bulunabilmektedir (Şekil 14).



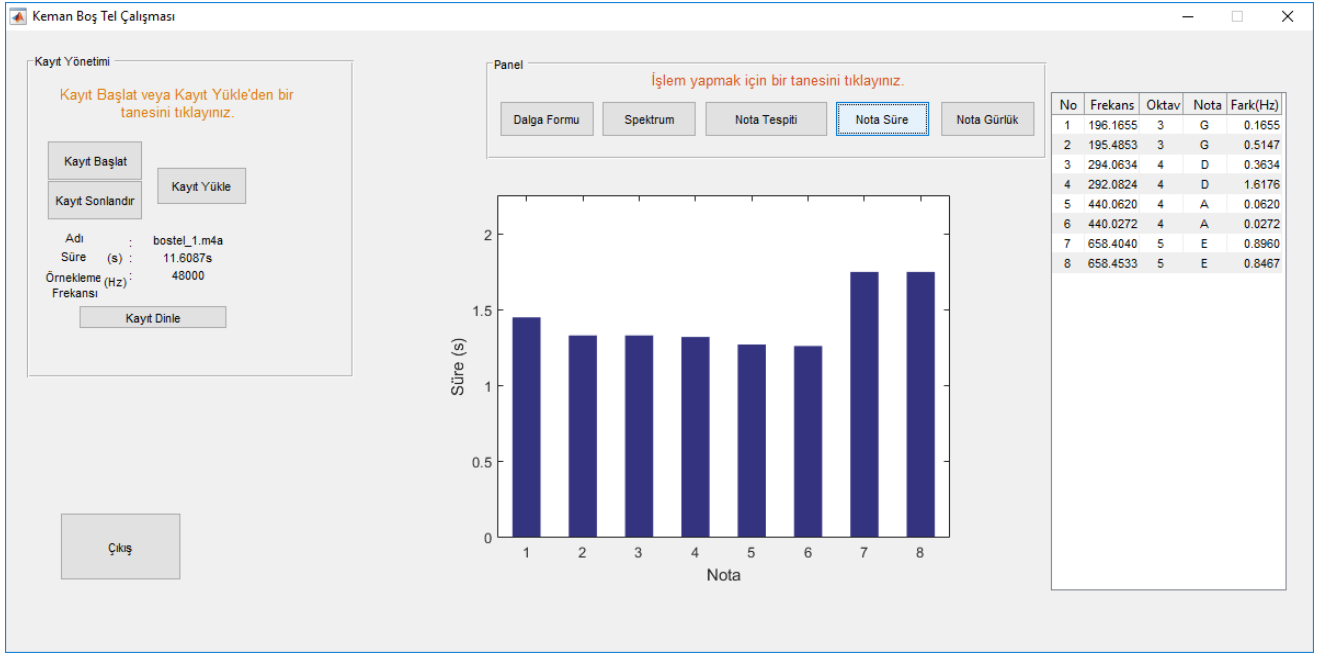
Şekil 11. Birinci katılımcıya ait boş tel kaydının a) dalga grafiği ve nota başlangıç zamanları b) karmaşık spektral fark yöntemiyle bulunan nota başlangıç zamanı tespit fonksiyonu grafiği.



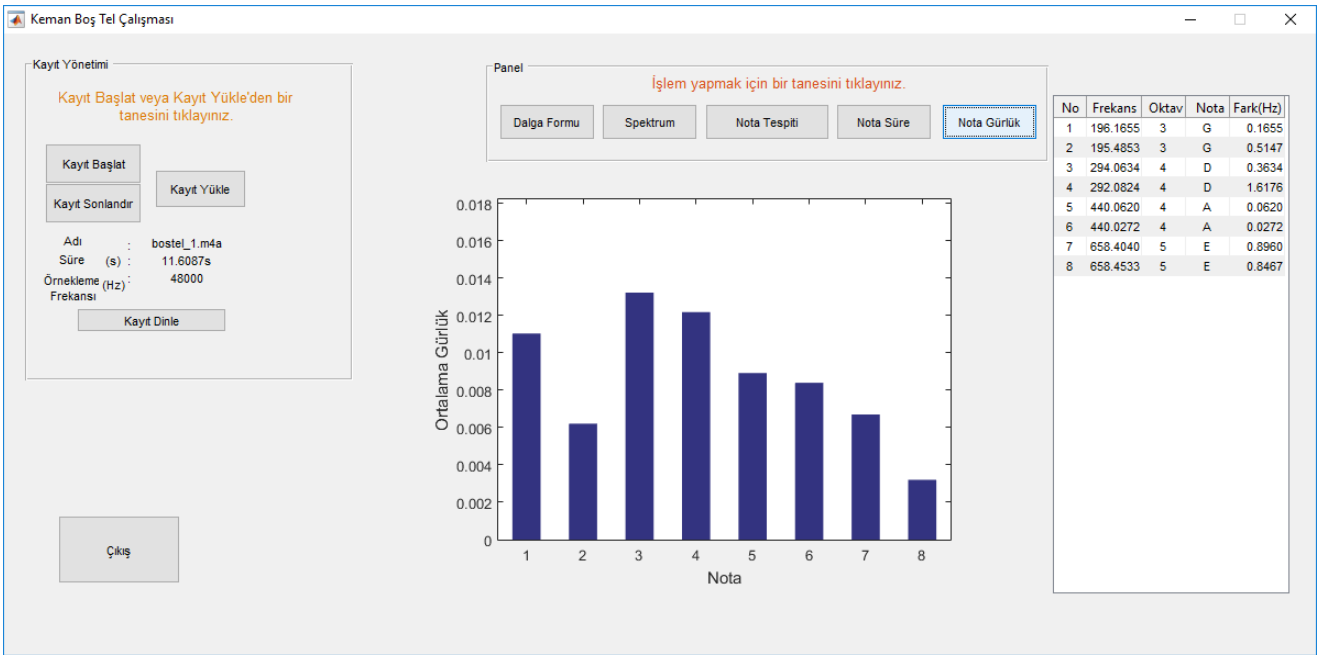
Şekil 12. Boş tel çalışması birinci kayıt için elde edilen nota tespit sonucu.

Tablo 8. Boş tel otomatik transkripsiyon ile bulunan frekans analiz sonuçları

Kayıt	İdeal Frekansa Göre Mutlak Hata (Hz)							
	G ₃	G ₃	D ₄	D ₄	A ₄	A ₄	E ₅	E ₅
1	0.1	0.5	0.3	1.6	0.0	0.0	0.9	0.8
2	0.3	0.5	0.2	0.3	0.6	1.5	0.7	0.4
3	0.5	0.4	1.9	1.8	0.9	1.7	0.9	0.8
4	0.0	0.1	1.3	0.6	0.3	1.1	1.2	1.9
5	0.5	0.7	0.3	1.8	1.8	0.7	1.0	2.4
6	0.4	0.0	1.5	1.0	1.4	2.1	2.4	1.9
7	1.1	0.7	1.9	0.1	0.4	0.0	2.5	1.0
8	0.9	0.6	0.6	0.4	1.8	0.5	1.4	1.7



Şekil 13. Boş tel çalışması birinci kayıt için elde edilen nota süreleri.

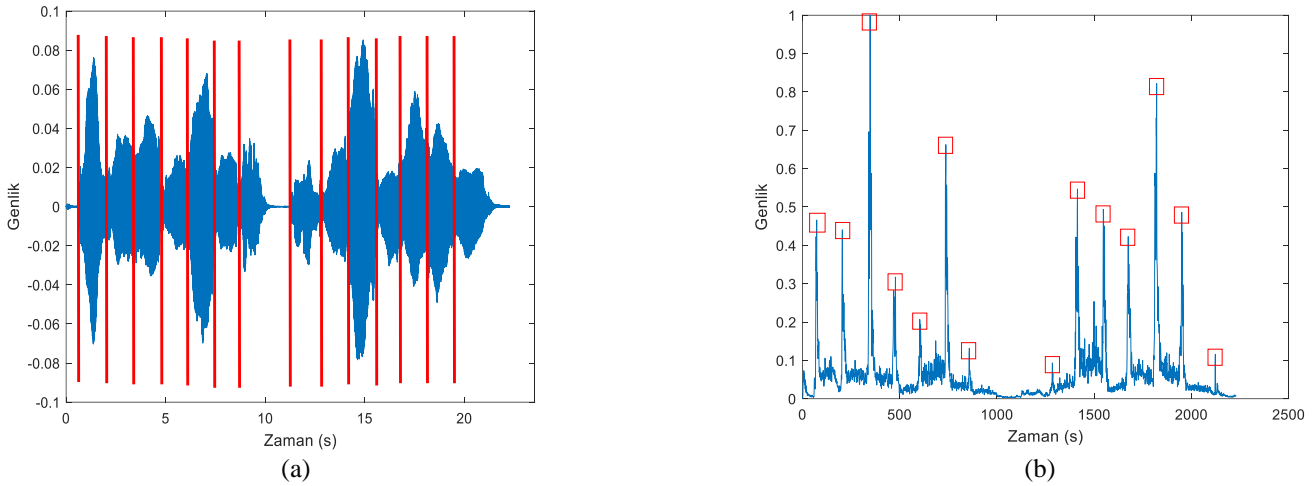


Şekil 14. Boş tel çalışması birinci kayıt için elde edilen nota gürlük değerleri.

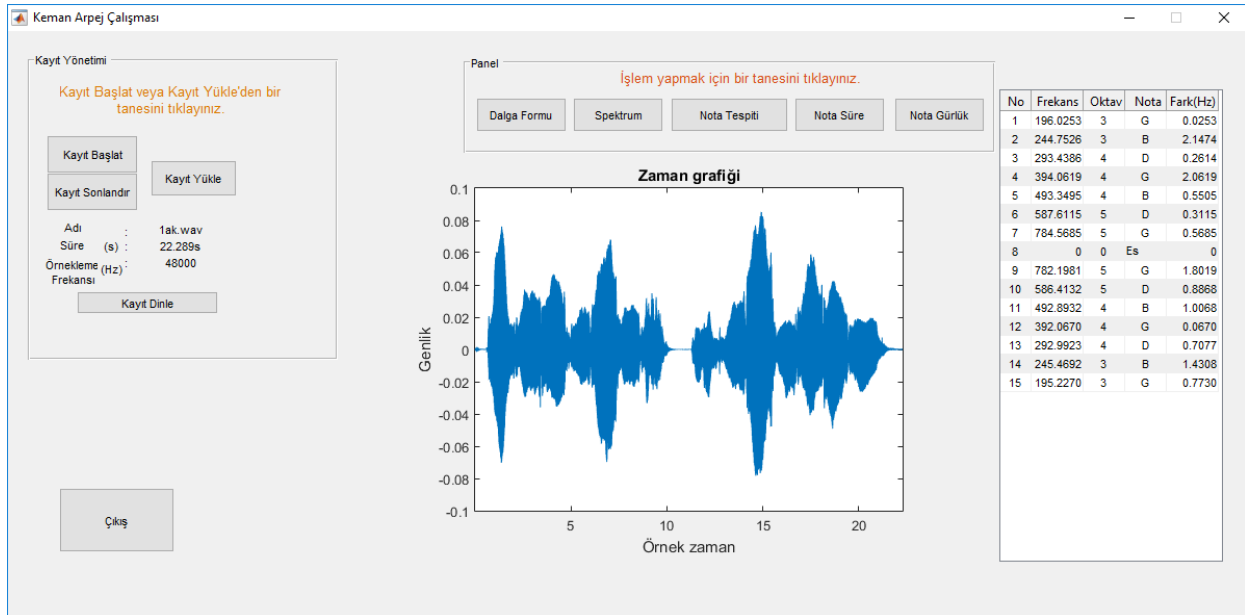
Arpej çalma kaydı için analiz sonuçları

Şekil 15.a'da birinci katılımcıya ait sol majör kayıt örneğinin dalga grafiği ile burada yer alan notaların başlangıç zamanları görülmektedir. Bu grafikte, kırmızı renkli çizgiler nota başlangıç zamanlarını göstermekte olup, bu dalga formunda 14 nota ve arada bir sus işaretinin var olduğu açıkça görülebilmektedir. Karmaşık spektral fark yöntemi kullanılarak elde edilen nota başlangıç zamanı tespit fonksiyonu grafiği Şekil 15.b'de verilmiştir. Burada tepe noktalara karşılık gelen yatay eksendeki değerler nota başlangıç değerlerini oluşturmaktadır.

Bu işlemleri otomatik olarak yapmak için hazırlanan arayüz Şekil 16'da görülmektedir. Bu arayüz, Şekil 8'de verilen arayüzde 'Arpej Çalışması' butonu tıklandığında çıkmaktadır. Kayıt yönetiminden birinci kişiye ait wav uzantılı (bu formatla da çalıştığını göstermek için) ses kaydı arayüze yüklenerek ve panel bölümünden "Nota Tespiti" seçildiğinde ilgili kayıttaki notaların oktav ve nota isimleri ile ideal frekans değerlerinden ne kadar fark ile çalındığı gösterilmektedir (Şekil 16). Birinci kayıt dışındaki diğer kayıtlar için de nota tespiti yapmak için sistem çalıştırıldığında Tablo 9'da belirtilen sonuçlara ulaşılmıştır. Sonuçlara bakıldığında en yüksek fark değerinin altıncı kayıta ait G5 notasında olduğu görülmektedir.



Şekil 15. Birinci katılımcıya ait arpej kaydının a) dalga grafiği ve nota başlangıç zamanları b) karmaşık spektral fark yöntemiyle bulunan nota başlangıç zamanı tespit fonksiyonu grafiği.



Şekil 16. Arpej çalışması birinci kayıt için elde edilen nota tespit sonucu.

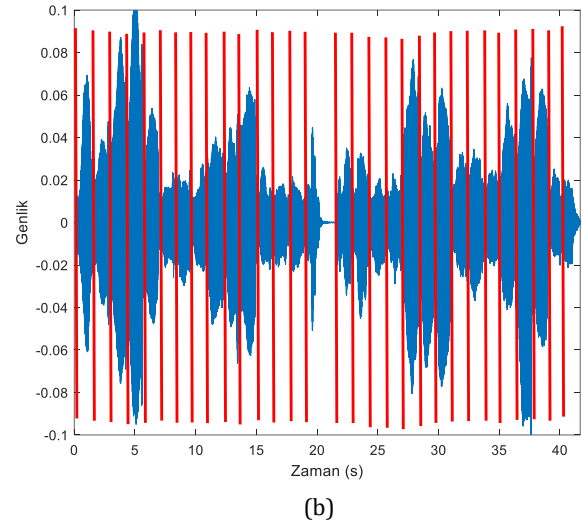
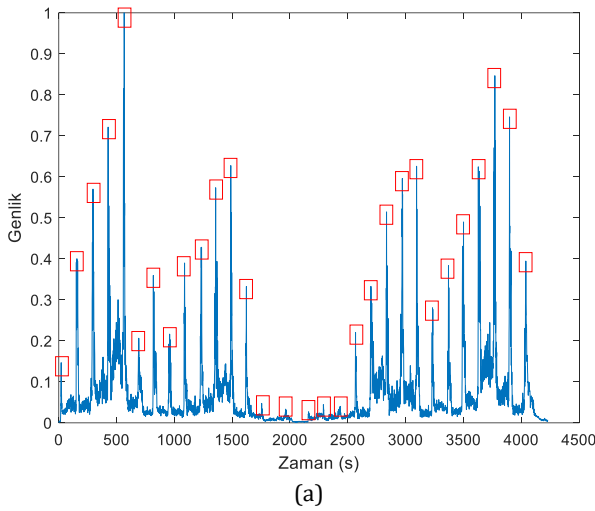
Tablo 9. Arpej otomatik transkripsiyon ile bulunan frekans analiz sonuçları
Arpej Nota Bazında İdeal Frekansa Göre Mutlak Hata (Hz)

No	G ₃	B ₃	D ₄	G ₄	B ₄	D ₅	G ₅	G ₅	D ₅	B ₄	G ₄	D ₄	B ₃	G ₃
1	0.03	2.15	0.26	2.06	0.55	0.31	0.57	1.80	0.89	1.01	0.07	0.71	1.43	0.77
2	0.64	2.03	0.86	0.15	0.51	1.16	0.41	3.62	0.66	0.81	0.56	1.39	2.57	0.53
3	1.22	0.93	0.58	0.44	0.08	0.65	0.46	0.87	1.52	1.85	0.15	0.06	0.92	0.07
4	0.54	1.40	1.09	2.30	0.09	0.08	1.31	1.65	0.63	1.31	1.21	0.96	0.95	0.69
5	0.20	1.85	1.31	1.68	1.34	1.12	0.62	5.22	0.18	0.08	1.07	1.16	2.35	0.49
6	0.67	0.94	3.18	3.14	0.39	1.40	5.27	1.07	1.31	1.34	0.02	1.16	1.44	0.77
7	0.38	0.00	0.86	2.44	1.78	0.91	1.48	1.62	1.31	1.63	1.19	0.61	0.48	0.49
8	0.04	1.48	2.01	1.07	2.78	0.47	2.48	1.31	0.42	1.38	1.21	0.16	0.96	0.85

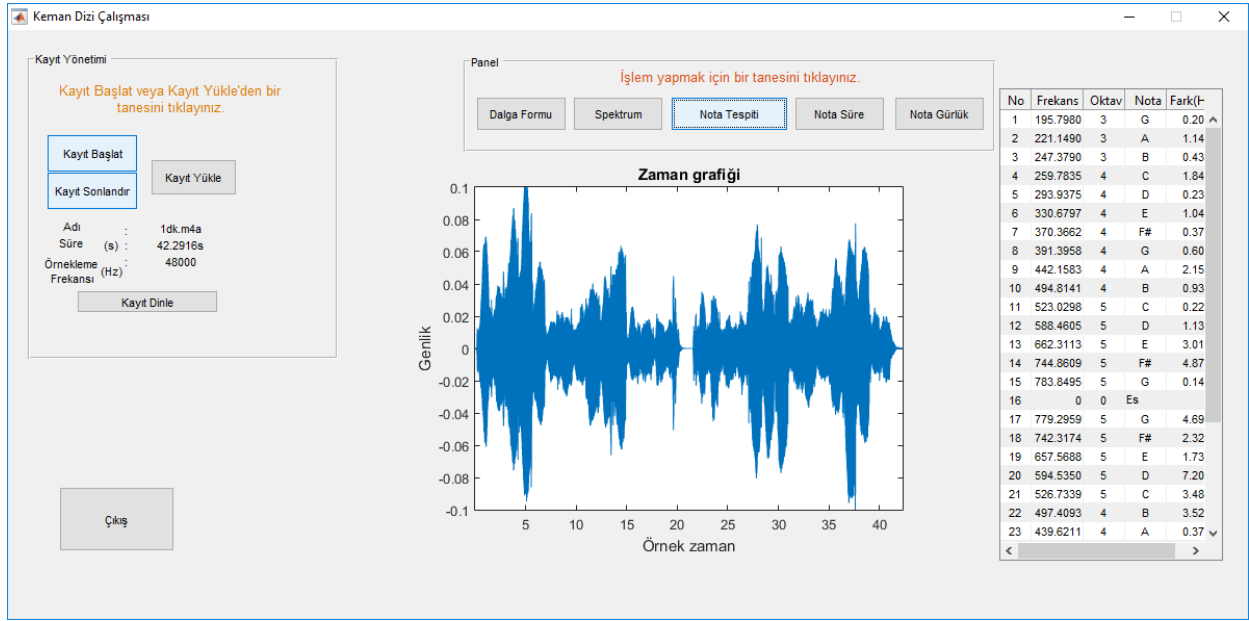
Dizi çalma kaydı için analiz sonuçları

Şekil 17.a'da birinci katılımcıya ait sol major dizi kayıt örneğinin dalga grafiği ile burada yer alan notaların başlangıç zamanları görülmektedir. Bu grafikte, kırmızı renkli çizgiler nota başlangıç zamanlarını göstermekte olup, bu dalga formunda otuz notanın var olduğu açıkça görülebilmektedir. Karmaşık spektral fark yöntemi kullanılarak elde edilen benzeşim sonucu Şekil 17.b'de verilmiştir. Burada tepe noktalara karşılık gelen yatay eksendeki değerler nota başlangıç değerlerini oluşturmaktadır.

Dizi kaydı otomatik transkripsiyon için hazırlanan arayüz Şekil 18'de görülmekte olup, birinci katılımcı için elde edilen nota tespit sonuçları da bu şekilde verilmiştir. Bu arayüz, Şekil 8'de verilen arayüzde 'Dizi Çalışması' butonu tıkladığında çıkmaktadır. Diğer kayıtlar içinde sistem çalıştırıldığında Tablo 10'da belirtilen sonuçlara ulaşılmıştır. Sonuçlardan en yüksek fark değerinin beşinci kayıta ait F#5 notasında olduğu görülmektedir.



Şekil 17. Birinci katılımcıya ait dizi kaydının a) dalga grafiği ve nota başlangıç zamanları b) karmaşık spektral fark yöntemiyle bulunan nota başlangıç zamanı tespit fonksiyonu grafiği.



Şekil 18. Dizi çalışması birinci kayıt için elde edilen nota tespit sonucu.

Tablo 10. Dizi otomatik transkripsiyon ile bulunan frekans analiz sonuçları.

Nota	Dizi Nota Bazında İdeal Frekansa Göre Mutlak Hata (Hz)							
	Kayıt No							
	1	2	3	4	5	6	7	8
G ₃	0.20	0.38	0.76	0.42	0.38	0.04	0.25	0.48
A ₃	1.15	0.85	0.32	1.47	0.38	0.52	0.79	1.29
B ₃	0.44	0.39	0.94	1.25	0.99	2.29	0.44	1.35
C ₄	1.85	1.01	1.83	2.07	0.51	0.23	0.04	2.38
D ₄	0.24	0.58	0.01	0.60	0.76	0.39	0.01	1.39
E ₄	1.05	1.15	0.14	4.03	0.90	2.42	0.76	1.18
F# ₄	0.38	0.92	1.72	0.80	0.87	1.82	2.57	0.37
G ₄	0.60	0.56	2.06	2.15	0.33	0.07	1.15	1.37
A ₄	2.16	0.50	2.13	0.30	0.02	1.41	0.02	0.19
B ₄	0.93	1.64	1.75	0.07	0.08	0.07	2.33	0.73
C ₅	0.22	1.66	0.12	0.09	0.73	0.01	0.74	1.00
D ₅	1.13	1.40	2.40	0.92	1.15	1.99	2.77	1.58
E ₅	3.01	0.92	1.86	2.11	6.79	7.65	0.12	3.39
F# ₅	4.87	2.05	0.72	3.49	6.55	0.59	8.90	0.66
G ₅	0.14	5.50	1.84	4.61	1.68	0.65	1.98	3.02
G ₅	4.69	2.27	0.03	8.29	4.74	0.58	3.38	1.03
F# ₅	2.33	1.92	0.71	5.65	11.88	5.00	2.08	3.47
E ₅	1.73	0.04	5.25	1.27	9.55	3.39	2.48	0.88
D ₅	7.21	1.77	0.24	0.45	0.24	0.89	0.47	1.83
C ₅	3.48	1.88	0.36	4.75	0.88	0.63	1.75	0.98
B ₄	3.53	4.24	0.93	0.99	4.34	1.88	0.49	1.80
A ₄	0.38	0.64	1.47	0.15	0.56	0.34	0.71	0.50
G ₄	0.85	0.80	1.06	3.26	0.02	2.17	0.41	0.62
F# ₄	1.73	2.31	2.40	0.89	0.37	0.96	3.07	0.36
E ₄	0.84	1.44	3.14	0.42	1.44	3.40	1.35	0.84
D ₄	0.01	0.09	0.50	1.44	0.86	1.11	0.73	1.31
C ₄	0.04	2.99	1.25	3.46	0.58	1.52	0.12	0.71
B ₃	0.52	0.88	0.97	0.44	0.45	1.90	2.65	1.73
A ₃	0.67	2.49	2.22	0.84	0.94	0.63	1.35	0.10
G ₃	1.63	0.53	1.08	0.15	0.67	0.85	0.76	0.69

Sonuçlar

Bu çalışmada, başlangıç seviyesi keman öğreniminde öğrencilere yardımcı olabilecek bir kullanıcı arayüz tasarımı gerçekleştirilmiştir.

Önerilen arayüz, temel keman eğitimi etütlerinden olan boş tel çalma, sol majör arpej çalma ve sol majör dizi çalma için tasarlanmıştır. Bu sistemi tasarlayabilmek için öncelikle keman seslerini notalarına doğru bir şekilde otomatik ayırt edebilecek bir transkripsiyon sistemi oluşturulmuştur. Önerilen otomatik transkripsiyon, öncelikle nota başlangıç zamanlarını tespit etmeye ve sonra frekans analiziyle notaların temel frekansını bulmaya dayanmaktadır. Nota başlangıç zamanları tespiti için farklı yöntemler denenmiş ve bunlar arasında karmaşık spektral fark yönteminin keman sesleri için en uygun olduğu sonucuna varılmıştır. Kayıtlar notaya başarılı bir şekilde bölündükten sonra, her bir notanın temel frekansı bulunarak hangi nota olduğu ve ideal frekanstan ne kadar saptığı tespit edilmiştir. Bununla birlikte arayüz üzerinde süre ve gürlük analizleri de yapılabilecek şekilde sistem geliştirilmiştir.

Matlab tabanlı MIRtoolbox ve C++ tabanlı Essentia, ses sinyalleri için çok çeşitli analizlerin yapılabileceği ve daha çok bilimsel amaçlı kullanıma sahip iyi bilinen açık kaynak yazılım kütüphaneleridir. Bu kütüphaneler keman dışındaki çalgılara (daha çok piyano ve gitar gibi) ait ses zarfı görece kolay sesler için başarılı olmuş otomatik müzik transkripsiyon yöntemlerini içermektedirler. MIRtoolbox ve Essentia yazılımları, bu çalışmada kullanılan sekiz kişiye ait keman sesi veri seti için uygulandığında, bu yazılımlardaki yöntemlerin nota başlangıç zamanı bulmada bazı problemler yaşadıkları gözlemlenmiştir. Şu anki oluşturulan sistem boş tel çalma, sol major arpej çalma ve sol major dizi çalma etütlerine ait eşit vurulu sesler için başarılı bir şekilde çalışmaktadır. Dolayısıyla, önerilen kullanıcı arayüzü bu tür etütler için öğrencilere faydalı bir geri dönüt yapabilecektir.

İleriki çalışma olarak, farklı tonlarda arpej ve dizi etütleri için çalışma kapsamı genişletilebilir. Yapılacak etütler farklı metronom hızlarında ve müziksel dinamikler içerecek şekilde çalınabilir. Ayrıca sistem gerçek zamanlı olarak çalışacak şekilde geliştirilebilir.

Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur. İlgili makale, yüksek lisans tezinden üretilmiştir.

Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Yazar Katkıları

Tüm yazarlar makaleye yeterli derecede katkıda bulunmuştur. İlgili makale yüksek lisans tezinden oluşturulmuştur. Yazarlar yüksek lisans tez öğrencisi ve tez danışmanıdır.

-Çalışma konsepti ve tasarım (K.A.)

-Veri toplama (K.A.)

-Verilerin analizi ve yorumlanması (K.A. ve T.Ş.A.)

-Taslağın oluşturulması (K.A.)

- Diğer katkılar: Gerçekleştirilen çalışmada K.A. transkripsiyon sisteminin geliştirilmesi, literatür taraması, kullanılan malzemelerin temin edilmesi; T.Ş.A., literatür taraması, arayüz sisteminin geliştirilmesi başlıklarında ayrıca katkı sunmuşlardır.

Teşekkür

Bu çalışmanın yürütülmesi sırasında desteklerini esirgemeyen Yaylı Çalgılar Müzik Eğitimcisi Prof.Dr. Ahmet Serkan Ece'ye teşekkür ederiz.

Kaynaklar

- [1] Parker B. *Güçlü Titreşimler - Müziğin Fiziği*. Birinci baskı. Ankara, Türkiye, TÜBİTAK Yayınları, 2015.
- [2] Çuhadar CH. "Kemanda çalma teknikleri". *Çukurova Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 18(1), 121-132, 2009.
- [3] Uçan A. *Müzik Eğitimi: Temel Kavramlar-İlkeler-Yaklaşımlar*. Ankara, Türkiye, Müzik Ansiklopedisi Yayınları, 1997.
- [4] Öz NB. "İnsanın kültürel gelişiminde müzik eğitiminin önemi". *Uludağ Üniversitesi Eğitim Fakültesi Dergisi*, 14(1), 101-106, 2001.
- [5] Çuhadar CH. "Müzik ve beyin". *Çukurova Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 17(2), 67-76, 2008.
- [6] Durahim AO, Setirek AC, Özel BB, Kebapçı H. "Music emotion classification for Turkish songs using lyrics". *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 24(2), 292-301, 2018.
- [7] Hallam S. "The power of music: its impact on the intellectual, social and personal development of children and young people". *International Journal of Music Education*, 28(3), 269-289, 2010.
- [8] Topalak Ş. "Güzel sanatlar lisesi çalgı eğitimi/öğretiminde karşılaşılan sorunların incelenmesi". *Sanat Eğitimi Dergisi*, 1(2), 114-129, 2013.
- [9] Qionggang R. "Application and research on digital music technology in music teaching". *Computer-Aided Industrial Design & Conceptual Design*, Wenzhou, China, 26-29 November 2009.
- [10] Liang YC, Shiue YM, Huang YM, Liu CG. "Development of a digital game-based learning system in music learning". *Advanced Materials for Science and Engineering*, Tainan, Taiwan, 12-13 November 2016.
- [11] Pati KA, Gururani S, Lerch A. "Assessment of student music performances using deep neural networks". *Applied Sciences*, 1-8(4), 1-18, 2018.
- [12] Klapuri AP. *Signal Processing Methods for the Automatic Transcription of Music*. PhD Thesis, Tampere University of Technology, Tampere, Finland, 2004.
- [13] Muller M, Ellis DP, Klapuri A, Richard G. "Signal processing for music analysis". *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 5(6), 1088-1110, 2011.
- [14] Muller M. *Fundamentals of Music Processing: Audio, Analysis, Algorithms, Applications*. 1st ed. Switzerland, Springer International Publishing, 2015.
- [15] Chis LG, Marcu M, Dragan F. "Software tool for audio signal analysis and automatic music transcription".

- IEEE 12th International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics (SACI)*, Timisoara, Romania, 17-19 May 2018.
- [16] Benetos E, Dixon S, Duan Z, Ewert S. "Automatic music transkriptin: an overview". *IEEE Signal Processing Magazine*, 36(1), 20–30, 2019.
- [17] Wu YT, Luo YJ, Chen TP, Wei IC, Hsu JY, Chuang YC, Su L. "Omnizart: a general toolbox for automatic music transcription". *arXiv*, 2106.00497 [cs.SD], 2021
- [18] Argenti F, Nesi P, Pantaleo G. "Automatic transcription of polyphonic music based on the constant-q bispectral analysis". *IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, 19(6), 1610-1630, 2011.
- [19] Benetos E, Dixon S, Giannoulis D, Kirchhoff H, Klapuri A. "Automatic music transcription: breaking the glass ceiling". *International Society for Music Information Retrieval Conference*, Porto, Portugal, 8-12 October 2012.
- [20] Avci K, Acuner TŞ. "Keman Kayıtlarından Boş Tel Notalarının Otomatik Transkripsiyonu", 25. *IEEE Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları Kurultayı (SIU-2017)*, Antalya, Türkiye, 15 – 18 Mayıs 2017.
- [21] Bello JP, Daudet L, Abdallah S, Duxbury C, Davies M, Sandler MB. "A tutorial on onset detection in music signals". *IEEE Transactions on Speech and Audio Processing*, 13(5), 1035-1047, 2005.
- [22] Moorer JA. "On the transcription of musical sound by computer". *Computer Music Journal*, 1(4), 32-38, 1977.
- [23] Piszczalski M, Galler BA. "Automatic music transcription". *Computer Music Journal*, 1(4), 24-31, 1977.
- [24] Klapuri AP. "Automatic music transcription as we know it today". *Journal of New Music Research*, 33(3), 269-282, 2004.
- [25] Benetos E, Dixon S, Giannoulis D, Kirchhoff H, Klapuri A. "Automatic music transcription: challenges and future directions". *Journal of Intelligent Information Systems*, 41(3), 407-434, 2013.
- [26] Tavares TF, Barbedo JGA, Attux R, Lopes A. "Survey on automatic transcription of music: Historical overview of techniques". *Journal of the Brazilian Computer Society*, 19(4), 589-604, 2013.
- [27] Gowrishankar B, Bhajantri NU. "An exhaustive review of automatic music transcription techniques: survey of music transcription techniques". *Signal Processing, Communication, Power and Embedded System*, Odisha, India, 3-5 October 2016.
- [28] Yazawa K, Itoyama K, Okuno HG. "Automatic transcription of guitar tablature from audio signals in accordance with player's proficiency". *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, Florence, Italy, 4-9 May 2014.
- [29] Abesser J, Schuller G. "Instrument-centered music transcription of solo bass guitar recordings". *IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, 25(9), 1741-1750, 2017.
- [30] Kehling C, Abeßer J, Dittmar C, Schuller G. "Automatic Tablature transcription of electric guitar recordings by estimation of score and instrument-related parameters". *Digital Audio Effects Workshop (DAFx)*, Erlangen, Germany, 1-5 September 2014.
- [31] Kirkpatrick T, Andreas J, Klein D. "Unsupervised transcription of piano music". *Advances in Neural Information Processing Systems (NIPS 2014)*, Montreal, Canada, 8-13 December 2014.
- [32] Akbari M, Cheng H. "Real-time piano music transcription based on computer vision". *IEEE Transactions on Multimedia*, 17(12), 2113-2121, 2015.
- [33] Wan Y, Wang X, Zhou R, Yan Y. "Automatic piano music transcription using audio-visual features". *Chinese Journal of Electronics*, 24(3), 596-603, 2015.
- [34] Gillet O, Richard G. "Transcription and separation of drum signals from polyphonic music". *IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, 16(3), 529-540, 2008.
- [35] Wu CW, Dittmar C, Southall C, Vogl R, Widmer G, Hockman J, Müller M, Lerch A. "A review of automatic drum transcription". *IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, 26(9), 1457-1483, 2018.
- [36] Wei IC, Wu CW, Su L. "Improving automatic drum transcription using large-scale audio-to-midi aligned data". *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, Toronto, Canada, 6-11 June 2021.
- [37] Souza VM, Batista GE, Souza-Filho NE. "Automatic classification of drum sounds with indefinite pitch". *International Joint Conference on Neural Networks*, Killarney, Ireland, 12-17 July 2015.
- [38] Marolt M. "Automatic transcription of bell chiming recordings". *IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, 20(3), 844-853, 2012.
- [39] Skoki A, Ljubic S, Lerga J, Atajduhar I. "Automatic music transcription for traditional woodwind instruments sopele". *Pattern Recognition Letters*, 128(2019), 340-347, 2019
- [40] Kroher N, Gomez E. "Automatic transcription of flamenco singing from polyphonic music recordings". *IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech and Language Processing*, 24(5), 901-913, 2016.
- [41] Dhara P, Rengaswamy P, Rao KS. "Designing automatic note transcription system for hindustani classical music". *International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics*, Jaipur, India, 21-24 September 2016.
- [42] Muto Y, Tanaka T. "Transcription system for music by two instruments". *6th Signal Processing Conference*, Beijing, China, 26-30 August 2002.
- [43] Krishnaswamy A, Smith JO. "Inferring control inputs to an acoustic violin from audio spectra". *International Conference on Multimedia and Expo*, Baltimore, USA, 6-9 July 2003.
- [44] Charles JA, Fitzgerald D, Coyle E. "Towards a computer assisted violin teaching aid". *International Symposium on Psychology and Music Education*, Padua, Italy, 29 November 2004.
- [45] Yin J, Dhanik A, Hsu D, Wang Y. "The creation of a music-driven digital violinist". *12th ACM International Conference on Multimedia*, New York, USA, 10-16 October 2004.
- [46] Yin J, Wang Y, Hsu D. "Digital violin tutor: an integrated system for beginning violin learners". *13th*

- ACM International Conference on Multimedia, Hilton, Singapore, 6-11 November 2005.
- [47] Vogel BK, Jordan MI, Wessel D. "Multi-instrument musical transcription using a dynamic graphical model". *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, Philadelphia, USA, 19-23 March 2005.
- [48] Boo WJJ, Wang Y, Loscos A. "A violin music transcriber for personalized learning". *IEEE International Conference on Multimedia and Expo*, Toronto, Canada, 9-12 July 2006.
- [49] Loscos A, Wang Y, Boo WJJ. "Low level descriptors for automatic violin transcription". *International Society for Music Information Retrieval Conference*, Victoria, Canada, 8-12 October 2006.
- [50] Charles JA, Fitzgerald D, Coyle E. "Violin timbre space features". *IET Irish Signals and Systems Conference*, Dublin, Ireland, 28-30 June 2006.
- [51] Wang Y, Zhang B, Schleusing O. "Educational violin transcription by fusing multimedia streams". *International Workshop on Educational Multimedia and Multimedia Education*, Augsburg, Germany, 28 September 2007.
- [52] Thornburg H, Leistikow RJ, Berger J. "Melody extraction and musical onset detection via probabilistic models of framewise STFT peak data". *IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, 15(4), 1257-1272, 2007.
- [53] Zhang B, Zhu J, Wang Y, Leow WK. "Visual analysis of fingering for pedagogical violin transcription". *15th ACM International Conference on Multimedia*, Augsburg, Germany, 23-28 September 2007.
- [54] Lu H, Zhang B, Wang Y, Leow WK. "iDVT: an interactive digital violin tutoring system based on audio-visual fusion". *16th ACM International Conference on Multimedia*, Vancouver, Canada, 27-31 October 2008.
- [55] Charles JA, Fitzgerald D, Coyle E. "Violin sound quality detection". *IET Irish Signals and Systems Conference*, Galway, Ireland, 18-19 June 2008.
- [56] Maezawa A, Itoyama K, Takahashi T, Ogata T, Okuno HG. "Bowed string sequence estimation of a violin based on adaptive audio signal classification and context-dependent error correction". *International Symposium on Multimedia*, San Diego, USA, 14-16 December 2009.
- [57] Barbancho I, de la Bandera C, Barbancho AM, Tardon LJ. "Transcription and expressiveness detection system for violin music". *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, Taipei, Taiwan, 19 April 2009.
- [58] Maezawa A, Itoyama K, Komatani K, Ogata T, Okuno HG. "Automated violin fingering transcription through analysis of an audio recording". *Computer Music Journal*, 36(3), 57-72, 2012.
- [59] Huang HH. "Research and development of an automatic violin player". *7th World Congress on Intelligent Control and Automation*, Chongqing, China, 25-27 June 2008.
- [60] Huang HH, Li WH, Chen YJ, Wen CC. "Automatic violin player". *10th World Congress on Intelligent Control and Automation*, Beijing, China, 6-8 July 2012.
- [61] Carrillo AP, Bonada J, Maestre E, Guaus E, Blaauw M. "Performance control driven violin timbre model based on neural networks". *IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, 20(3), 1007-1021, 2012.
- [62] Wang JH, Wang SA, Chen WC, Chang KN, Chen HY. "Real-time pitch training system for violin learners". *IEEE International Conference on Multimedia and Expo Workshops*, Melbourne, Australia, 9-13 July 2012.
- [63] Lin YJ, Wang TM, Chen TC, Chen YL, Chang WC, Su AW. "Musical note analysis of solo violin recordings using recursive regularization". *EURASIP Journal on Audio, Speech, and Music Processing*, 25(2014), 1-13, 2014.
- [64] Pardue LS, Harte C, McPherson AP. "A low-cost real-time tracking system for violin". *Journal of New Music Research*, 44(4), 305-323, 2015.
- [65] Jo W, Park H, Lee B, Kim D. "A study on improving sound quality of violin playing robot". *6th International Conference on Automation, Robotics and Applications*, Queenstown, New Zealand, 17-19 February 2015.
- [66] Liang CY, Su L, Yang YH, Lin HM. "Musical offset detection of pitched instruments: the case of violin". *International Society for Music Information Retrieval Conference*, Malaga, Spain, 26-30 October 2015.
- [67] Jo W, Lee B, Kim D. "Development of auditory feedback system for violin playing robot". *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 17(6), 717-724, 2016.
- [68] Maruyama T, Uemura T. "Development of a violin playing robot and its sound volume and pitch controls". *56th Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan*, Kanazawa, Japan, 19-22 September 2017.
- [69] Yura J, Oyun-Erdene M, Byambasuren BE, Kim D. *Modeling of Violin Playing Robot Arm with Matlab/Simulink*. Editors: Kim JH, Karray F, Jo J, Sincak P, Myung H. Robot Intelligence Technology and Applications 4 of Advances in Intelligent Systems and Computing, 249-261, Switzerland, Springer-Cham, 2017.
- [70] Li B, Dinesh K, Sharma G, Duan Z. "Video-based vibrato detection and analysis for polyphonic string music". *International Society for Music Information Retrieval Conference*, Suzhou, China, 23-27 October 2017.
- [71] Pardue LS, McPherson A. "Real-time aural and visual feedback for improving violin intonation". *Frontiers in Psychology*, 10(627), 1-19, 2019.
- [72] Ortega FJM, Giraldo SI, Perez A, Ramirez R. "Phrase-level modeling of expression in violin performances". *Frontiers in Psychology*, 1-11, 10(776), 2019.
- [73] Özmenteş S. "Müzik eğitiminin boyutları ve çalgı eğitimi". *İnönü Üniversitesi Eğitim Fakültesi Dergisi*, 6(9), 89-98, 2005.
- [74] Lartillot O, Toivainen P. "A Matlab toolbox for musical feature extraction from audio". *Digital Audio Effects Workshop (DAFx)*, Bordeaux, France, 10-14 September 2007.
- [75] Bogdanov D, Wack N, Gómez E, Gulati S, Herrera P, Mayor O, Roma G, Salamon J, Zapata J, Serra X.

- "Essentia: an open-source library for sound and music analysis". *21st ACM International Conference on Multimedia*, Barcelona, Spain, 21-25 October 2013.
- [76] Duxbury C, Bello JP, Davies M, Sandler M. "A combined phase and amplitude based approach to onset detection for audio segmentation". *Workshop on Image Analysis for Multimedia Interactive Services*, London, UK, 9-11 April 2003.
- [77] Music Technology Group (MTG). "Essentia". https://github.com/MTG/essentia/blob/master/src/examples/standard_pitchdemo.cpp (22.11.2017).
- [78] Brossier PM. Automatic Annotation of Musical Audio for Interactive Applications. PhD Thesis, Queen Mary University of London, London, UK, 2007.
- [79] Salamon J, Gomez E. "Melody extraction from polyphonic music signals using pitch contour characteristics". *IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, 20(6), 1759–1770, 2012.
- [80] Klapuri AP. "Multiple fundamental frequency estimation by summing harmonic amplitudes". *International Society for Music Information Retrieval Conference*, Victoria, Canada, 8-12 October 2006.



Optimal LQR Controller Methods for Double Inverted Pendulum System on a Cart

Tayfun ABUT^{1*}

¹ Muş Alparslan University, Mechanical Engineering Department, tayfunabut@gmail.com, Orcid No: 0000-0003-4646-3345

ARTICLE INFO

Article history:

Received 20 February 2023
Received in revised form 7 April 2023
Accepted 1 June 2023
Available online 20 June 2023

Keywords:

Double Inverted Pendulum System on a Cart (DIPSC), Optimal Control, Linear Quadratic Regulator (LQR), GA, PSO, GWO

Doi: 10.24012/dumf.1253331

* Corresponding author

ABSTRACT

Most of the systems in our lives are inherently nonlinear and unstable. In control problems in the field of engineering, the aim is to define the control laws that maximize the operating efficiency of these systems under diverse security coefficients, and constraints and minimize error rates. This study aimed to model and optimally control a Double-Inverted Pendulum System on a Cart (DIPSC). A DIPSC was modeled using the Lagrange-Euler method, and classical and optimal Linear Quadratic Regulator (LQR) control methods were designed for the control of the system. The purpose of the designed controllers is to keep the arms of the double inverted pendulum on the moving cart vertically in balance and to bring the cart to the determined balance position. The critically important Q and R parameters of the LQR control technique that is one of the optimal control techniques were obtained using the Genetic Algorithm (GA), Particle Swarm Optimization (PSO), and Grey Wolf Optimization (GWO) algorithms. The DIPSC system was checked using classical LQR and optimal LQR methods. All obtained results are given graphically. The proposed methods are presented and analyzed in tabular form using Settling time and Mean-Square-Error (MSE) performance criteria.

Introduction

A pair of inverted pendulum systems on a cart is one of the systems that have been tested and validated by the methods proposed in control studies due to their incompletely driven and non-linear structure. The usage areas of these systems are quite wide, from human walking to satellite and rocket modeling, from aircraft landing and take-off to ship balancing modeling, etc.[1-5]. The double-inverted pendulum is based on the principle of balancing the arms with the movement of the cart. This balancing problem is quite difficult since it is driven by a single motor, and the continuous movement of the arms leads to the instability of the system.

In the literature, double-inverted pendulum systems on a cart (DIPSC) have been tried to be controlled by using different control types at different times. Furuta et al., [6] performed the control of a double inverted pendulum on a cart (DIPSC) system in a simulation and experimental environment with a computer program called CADOS. Ceheng et al., [7] performed the control of a real-time DIPSC system obtained by combining composition coefficient fuzzy control theory with LQR optimal control theory. The method was tested on a DIPSC system with a sampling interval of 4 ms. Zhong and Rock [8] proposed a method of energy and passivity-based control of a DIPSCs

system. It has been demonstrated in simulation studies that it can stabilize the system steadily from any initial position. Bogdanov [9] proposed and simulated controller approaches for optimal control of a DIPSC system, consisting of LQR, situational Riccati equation, optimal neural network control, and their combinations. The simulations revealed the superior performance of the controller designed with the situational Riccati Equation over LQR and the improvements provided by the neural networks that compensate for the model deficiencies in LQR. Cheng-jun et al., [10] performed the control of a DIPSC and cart system whose boundaries of fuzzy logic membership functions were determined by a genetic algorithm optimization method. The method has been applied in the simulation environment, and it has been observed that the performance of the system has increased. Xiong and Wan [11] proposed the optimal LQR control method for the DIPSC system in numerical simulation. Q and R matrices, which are the weight matrices of the LQR method, were obtained using the particle swarm optimization (PSO) method. Tao et al., [12] proposed an adaptive fuzzy switch swing-up and sliding control method for a DIPSC. The efficacy of the suggested method was demonstrated through simulation studies. In addition, the effect of chatter is significantly reduced in the method.

Adeli et al., [13] modeled a DIPSC, an overhead crane, constructed a Takagi - Sugeno fuzzy model, and designed a parallel distributed fuzzy LQR controller. The method was supported by simulation studies. Hassanzadeh et al. [14] suggested a model-reference adaptive controller approach for the stabilization of a DIPSC and performed it in an experimental setting. In the proposed method, an LQR controller was initially used; however, in the next step, an LQG controller, which combines Kalman-Bucy filter estimation and LQR feedback control, is used to achieve better steady-state performance. LQR and PD control methods have been suggested to stably control a DIPSC [15]. The simulation studies revealed that the PD controller outperforms the LQR controller in terms of performance. Zhang and Zhang [16] proposed the self-adaptive LQR controller method for a planar DIPSC system and applied it in simulation and an experimental environment. According to the results obtained, the authors concluded that the method provides fast response and stability. LQR and LQR-based fuzzy controller design and control in a simulation environment for a DIPSC system were carried out in another study [17]. The LQR-based fuzzy controller has been found to perform better than the LQR method in controlling the DIPSC system, according to the results.

Wang et al. [18] proposed a Pareto-based Multi-Objective Binary Probability Optimization Algorithm (MBPOA)-based LQR controller and this method has been implemented in the DIPSC in simulation and experimental environments. A hybrid type-2 fuzzy logic control method obtained with the help of an RNA genetic algorithm is proposed for the control of a DIPSC. The parameters of Type 1 and Type 2 fuzzy logic methods are optimized by RNA genetic algorithm and compared. Better performance for DIPSC is achieved by using an optimized type-2 fuzzy logic control with RNA genetic algorithm [19]. Sultan and Farej [20] modeled a DIPSC system and simulated it using the LQR control method. According to the simulation results obtained, they saw a 57% and 79% decrease in peak amplitude for the lower arm and upper arm, respectively. Bandari et al., [21] proposed the LQR control method for real-time control of a DIPSC system. The successful demonstration of the controller's ability to restore stability after imparting impact distortion to both the first and second pendulums was made by the testing results.

Banerjee et al., [22] proposed the LQR method for the control of a DIPSC system. The traditional PID method was also used in the study to compare the performance of the method. Simulation of the DIPSC system was performed using the optimal LQR controller method [23]. In this study, the Q and R parameters of the controller are updated, and the G gain matrix is optimized using five different configurations of three different optimization algorithms (Particle Swarm Optimization (PSO), Artificial Bee Colony Algorithm (ABC), and Genetic Algorithm (GA)). Response time and response smoothness were measured for the outcomes produced by each algorithm, both alone and in combination. The controller optimized with the GA algorithm produced the quickest control response, while the

controller optimized with the ABC method had the smoothest response, according to the results.

The results obtained by using each algorithm were evaluated in terms of response speed and response smoothness, in itself and with each other. According to the results, the controller optimized with GA gave the fastest control response, while the smoothest response was provided by the controller optimized with the ABC algorithm. He et al. [24] have conducted a literature study on underdrive robotic systems. The challenges in current research are summarized, and information is provided for future research. Tijani and Jimoh [25] presented a comparative study of a DIPSC system, the optimal control open model predictive control (eMPC), and the linear quadratic control (LQR) method. The open model predictive control (the eMPC) method showed an effective performance compared to the LQR control method, especially in terms of reducing the peak values. Maraslidis et al., [26] proposed a fuzzy logic controller (FLC) for the control of a DIPSC system in a simulation environment. An LQR is used in the article to compare the results of the proposed method. According to the results obtained, it has been seen that the FLC method significantly reduced the stability and peak levels. Gil et al. [27] implemented reinforcement learning-based PD control for a DIPSC in a simulation environment. A DIPSC is simulated using a passive control method based on operator theory [28]. The chaotic dynamics of a DIPSC with a large angle of oscillation are studied based on Hamilton's canonical equation. It is found that the pendulum can maintain the equilibrium state as long as one of the coils has an oscillation angle of 0 degrees [29]. The oscillation and constant-time stabilization control of an incompletely driven DIPSC is carried out in a simulation environment [30].

This study aimed to model and optimally control a double-inverted pendulum system on a cart (DIPSC). A double inverted pendulum system on a cart (DIPSC) was modeled using the Lagrange-Euler method, and classical and optimal LQR control methods were designed for the control of the system. The purpose of the designed controllers is to keep the arms of the double inverted pendulum on the moving cart vertically in balance and to bring the cart to the determined balance position. The Genetic Algorithm (GA), Particle Swarm Optimization (PSO), and Grey Wolf Optimization (GWO) algorithms were used to determine the vitally essential Q and R parameters of the LQR control method, one of the optimal control methods. The DIPSC system was checked using classical LQR and optimal LQR methods. All obtained results are given graphically. The proposed methods are presented and analyzed in tabular form using the settling time and the Mean-Square-Error (MSE) performance criteria. The rest of this article is structured as follows. In Chapter 2, the model of the DIPSC system is presented. Recommended controllers for the system are shown in Chapter 3. GA, PSO, and GWO algorithms are given for the optimization of the parameters of the LQR control method. The simulation results obtained by applying the methods

suggested in Chapter 4 are given numerically and graphically. Chapter 5 summarizes the entire article and provides information on the development of this article and future work.

Modeling of Double Inverted Pendulum System on a Cart (DIPSC) System

Model equations, which have an important place in the control of systems in computer environments, are given below. The DIPSC was modeled using the Lagrange–Euler method. The free-body diagram of the DIPSC system is shown in Figure 1.

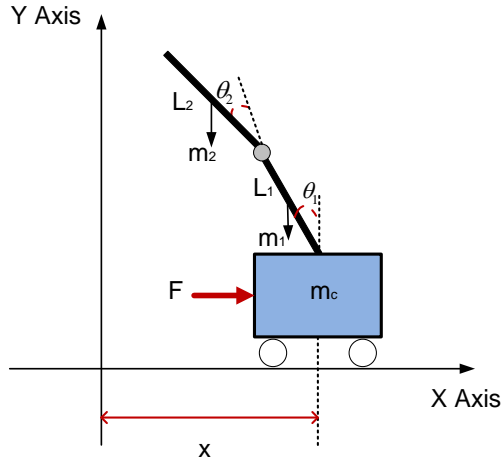


Figure 1. The physical representation of the DIPSC system

In the DIPSC system given in Figure 1, the variable parameters x , θ_1 and θ_2 represent the position of the cart, the angular position of the first pendulum, and the angle position of the second pendulum, respectively. L_1 is the length of the first pendulum, L_2 is the length of the second pendulum, m_c is the mass of the cart, m_1 is the mass of the first pendulum, and m_2 is the mass of the second pendulum. F represents the force acting on the cart. I_1 is the moment of inertia of the first pendulum, and I_2 is the moment of inertia of the second pendulum. The total kinetic and potential energies in the system consist of the kinetic and potential energies of the car and each bar separately. Since the car moves linearly on the horizontal axis, it has a kinetic energy originating from the translational movement only in this axis. Since the rods make both translational and rotational movements, their total kinetic energies constitute the translational and rotational kinetic energy originating from these movements. These Equations are given below.

$$x_{p_1} = x - l_1 \sin \theta_1 \rightarrow \dot{x}_{p_1} = \dot{x} - l_1 \dot{\theta}_1 \cos \theta_1 \quad (1a)$$

$$y_{p_1} = l_1 \cos \theta_1 \rightarrow \dot{y}_{p_1} = -l_1 \dot{\theta}_1 \sin \theta_1 \quad (1b) \quad (12a)$$

$$x_{p_2} = x - l_1 \sin \theta_1 - l_2 \sin (\theta_1 + \theta_2) \quad (2a)$$

$$y_{p_2} = l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos (\theta_1 + \theta_2) \quad (2b)$$

$$\dot{x}_{p_2} = \dot{x} - l_1 \dot{\theta}_1 \cos \theta_1 - l_2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \cos (\theta_1 + \theta_2) \quad (3a)$$

$$\dot{y}_{p_2} = -l_1 \dot{\theta}_1 \sin \theta_1 - l_2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \sin (\theta_1 + \theta_2) \quad (3b)$$

$$T_c = \frac{1}{2} m_c \dot{x}^2 \quad (4)$$

$$T_{p_1} = \frac{1}{2} m_{p_1} (\dot{x} - l_1 \dot{\theta}_1 \sin \theta_1)^2 - \frac{1}{2} m_{p_1} (-l_1 \dot{\theta}_1 \sin \theta_1)^2 + \frac{1}{2} I_p \dot{\theta}_1^2 \quad (5)$$

$$T_{p_2} = \frac{1}{2} m_{p_2} (\dot{x} - l_1 \dot{\theta}_1 \cos \theta_1 - l_2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \cos (\theta_1 + \theta_2))^2 + \frac{1}{2} m_{p_2} (-l_1 \dot{\theta}_1 \sin \theta_1 - l_2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \sin (\theta_1 + \theta_2))^2 + \frac{1}{2} I_p (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 \quad (6)$$

$$V_{p_1} = m_{p_1} g l_1 \cos \theta_1 \quad (7)$$

$$V_{p_2} = m_{p_2} g l_1 \cos \theta_1 + m_{p_2} g l_2 \cos (\theta_1 + \theta_2) \quad (8)$$

The equations of motion of the DIPSC are obtained by taking the following assumptions in the state-space form as follows:

$$\theta_1, \theta_2 \approx 0 \quad (9a)$$

$$\sin \theta_1, \sin \theta_2, \sin (\theta_1 + \theta_2) = 0 \quad (9b)$$

$$\cos \theta_1, \cos \theta_2, \cos (\theta_1 + \theta_2) = 1 \quad (9c)$$

$$\dot{\theta}_1^2, \dot{\theta}_2^2, \dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2^2 = 0 \quad (9d)$$

The equation of motion of a DIPSC is created in the state space model; $\dot{x} = Ax + Bu$ and $y = Cx + Du$ form as follows. The state variables of the DIPSC with trolley are trolley position - velocity and angular position - velocity of each pendulum. The output variables are the car position and the angular position of the pendulums. These variables are given in Equation (10).

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ \theta_1 \\ \theta_2 \\ \dot{x} \\ \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} \quad y = [x \quad \theta_1 \quad \theta_2] \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 & x_2 \\ \dot{x}_3 & x_4 \\ \dot{x}_5 & x_6 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 4.87 & -0.16 & -35.55 & -0.02 & 0.02 \\ 0 & 76.6 & -31.9 & -185.1 & -0.37 & 0.72 \\ 0 & -84.3 & 123.77 & 203.7 & 0.72 & -2.06 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 4.16 \\ 21.7 \\ -23.89 \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (12b)$$

$$D = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (12c)$$

Controller Design

While designing the controller, it was aimed to keep the arms of the double inverted pendulum with the linear moving cart vertically balanced and to bring the cart in a balanced position. This chapter describes the controller methods designed for the DIPSC. The control of the DIPSC aims to design a controller with minimum error to move the cart so that the actual position of the cart reaches the desired position. The DIPCS was controlled using the Linear Quadratic Regulator (LQR) control method. Here, how parameters of LQR control methods are obtained by using Genetic Algorithm (GA), Particle Swarm Optimization (PSO), and Grey Wolf Optimization (GWO) algorithms are given.

Linear Quadratic Regulator (LQR) Control Design

The Linear Quadratic Regulator (LQR) control method is a modern optimal control method based on state-space representation [32]. LQR is a full-state feedback controller. The primary goal of optimum control is to meet physical constraints to the best possible extent, while at the same time extreme (maximizing or minimizing) an appropriate performance index or cost function. LQR is widely used since it is an optimal and robust control method [33-34]. Below is a performance index for the control strategy that was obtained using state-space equations.

$$J = \frac{1}{2} \int_0^t (x^T(t)Qx + u^T Ru)dt \quad (13)$$

The control system is optimal when the parameters of the performance index are chosen to make the function either minimal or maximal. In classical linear optimal control, the control vector $u(t)$ is chosen so that the performance index is minimized. The performance indicator selected for system control is typically quadratic concerning both $x(t)$ and $u(t)$. It is desired that the integral of the sum of the expression containing Q and R matrices be minimum. This means minimizing Equation 13. Here, Q is a positive semi-definite symmetric matrix, and R is a positive definite number. Q and R are the weight matrices ($Q \geq 0, R > 0$). Then, the linear state feedback rule provides the best control that minimizes J . The control system is optimal when the parameters of the performance index are chosen to make the function either minimal or maximal. The control vector $u(t)$ is chosen in classical linear optimum control so that the performance index is minimized. The performance index chosen for system control is typically quadratic concerning

both $x(t)$ and $u(t)$. The integral of the sum of the expression including the Q and R matrices should be as small as possible. In this case, equation 13 must be reduced. Here, Q is a positive semi-definite symmetric matrix, and R is a positive definite number ($Q \geq 0, R > 0$). Q and R are the weight matrices. Then, the linear state feedback law is given the optimal control that minimizes J .

$$u = -K * x \quad (14)$$

The control strategy in this case aims to reduce the integral of the quadratic performance indicator. The function's value demonstrates how closely the system's real performance matches its intended performance. The given Equation (15) yields the K optimal feedback gain matrix.

$$K = T^{-1}(T^T)^{-1}B^T = R^{-1}B^T P \quad (15)$$

The value of the P positive definite matrix is obtained with the help of Riccati's Equation.

$$A^T P + PA - PBR^{-1}B^T P + Q = 0 \quad (16)$$

In this study, metaheuristic algorithms GA, PSO, and GWO methods were used. These algorithms are frequently used in the literature [35-40]. When using GA, PSO, and GWO to set the Q and R matrices, the first step is to start the chromosome in the GA method, swarm particle in the PSO method, and wolf population in the GWO method. Each chromosome, particle, and wolf population element is represented by a vector n representing the Q and R matrices. $n(1) Q(1,1), n(2) Q(3,3), n(3) Q(5,5)$ and $n(4)$ represent the R -value. Then, parameters such as the population and limits of the algorithms are described. An objective function based on the control input and the Mean Absolute Squared Error is suggested to determine the best control settings. All three algorithms search iteratively until it reaches any of the stopping criteria such as generation or the number of iterations, function tolerance, and time limit to minimize this objective function and find the optimal solution. Figure 2 illustrates the block schema of the LQR control method.

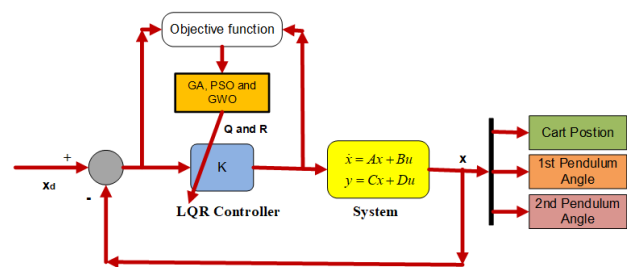


Figure 2. Block diagram of LQR control method

Numerical Results

This chapter provides simulation studies employing a DIPSC's model equations. In the control of the system, optimal LQR control methods were obtained by using classical LQR and GA, and PSO and GWO algorithms were used. The control variables of the system are the position of the cart and the angles of the pendulum. The results were obtained numerically according to the settling time and the MSE criteria, which are the performance criteria of the applied control methods. The physical parameters of

DIPSC were taken as $m_c=1.2$ kg, $m_{p1}=0.097$ kg, $m_{p2}=0.0127$ kg, $L_{p1}=0.2$ m, $l_{p1}=0.16$ m, $L_{p2}=0.34$ m, $l_{p2}=0.18$ m, $b_c=0.001$ Ns/m, and $b_{p1}=b_{p2}=0.024$ Ns/rad. The simulation time was set to 10 seconds. It was obtained from the classical LQR control parameters as $R = [1]$ and $Q = \text{diag} \{43 \ 50 \ 50 \ 11.25 \ 1.50\}$. In all optimization algorithms (GA, PSO, and GWO), the number of populations was taken as 40 and the number of iterations as 100. However, since sufficient convergence could not be achieved with the GA optimization algorithm, the number of populations was taken as 50. In addition, the maximum number of generations in GA was taken as 200, and the crossover and mutation probability as 0.8 and 0.4. The lower and upper limit values for the optimized Q and R parameters are taken as $lb = [1 \ 1 \ 1 \ 0.01]$ and $ub = [1000 \ 1000 \ 1000 \ 100]$. The LQR control parameters obtained using the GA optimization method are $R = [0.021]$ and $Q = \text{diag} \{60.3 \ 0.05 \ 0.03 \ 5.06 \ 0.01\}$. The LQR control parameters obtained using the PSO optimization method are $R = [0.001]$ and $Q = \text{diag} \{100 \ 0.1 \ 0.09 \ 190.6 \ 0.15\}$. The LQR control parameters obtained using the GWO optimization method are $R = [0.1]$ and $Q = \text{diag} \{20 \ 20 \ 600 \ 0 \ 0.15\}$. In Figure 3, a) The linear and angular positions, and b) the error graphs obtained using the classical LQR control method of DIPSC are given.

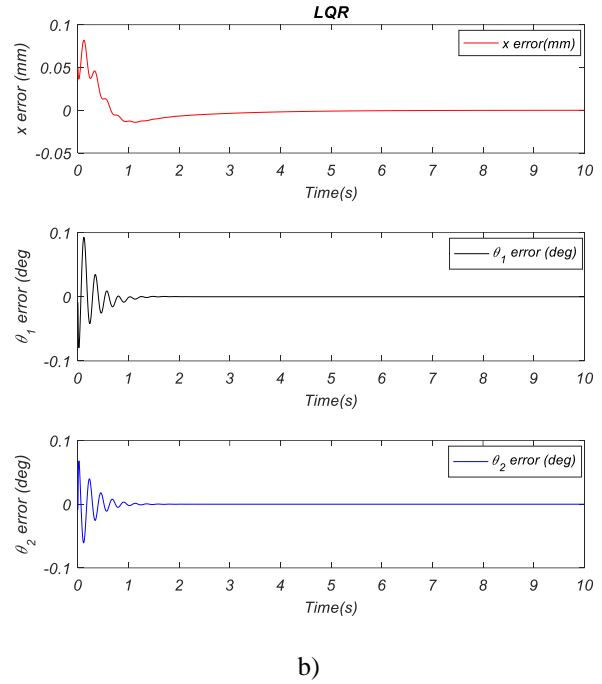
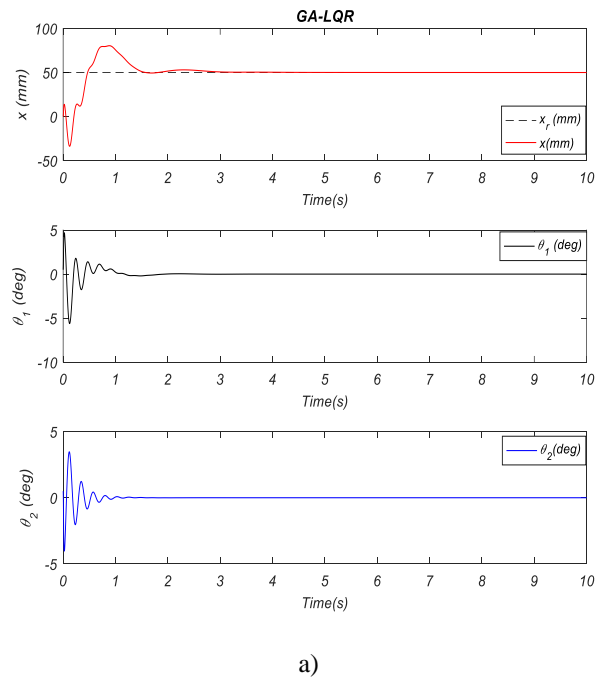
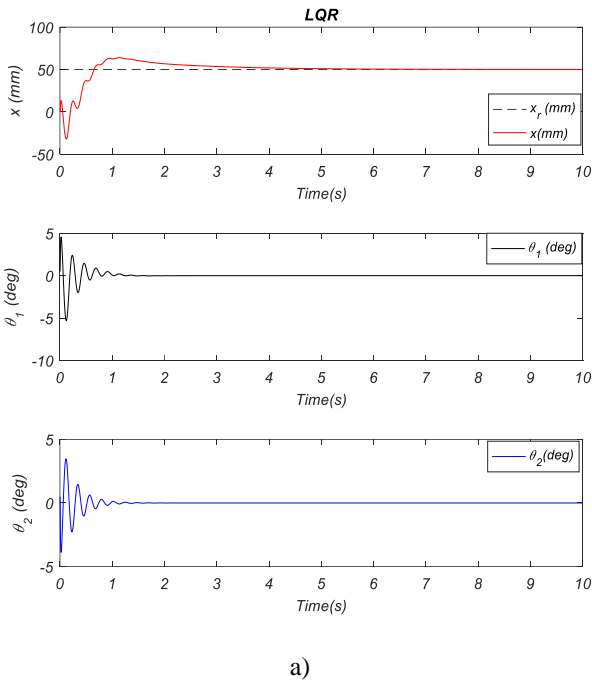


Figure 3. a) The linear and angular positions and b) the error graphs obtained using the classical LQR control method of DIPSC

As shown in Figure 3, the graph obtained as a result of the use of the classical LQR control method shows that the maximum overshoot occurred in the system. It is also seen that the cart reaches a settling time of approximately 5 seconds. In Figure 4, a) linear and angular positions and b) error graphs obtained using the GA-based optimal LQR control method of DIPSC are given.



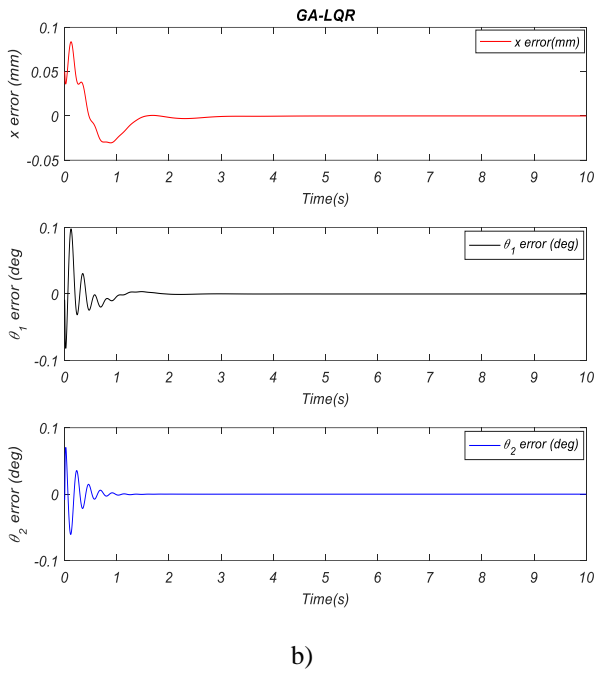


Figure 4. a) The linear and angular positions and b) the error graphs obtained using the GA-based optimal LQR control method of DIPSC

As seen in Figure 4, the graph obtained as a result of the use of the GA-based optimal LQR control method shows that the maximum overshoot in the system is increased compared to the classical LQR method. However, it is seen that the cart reaches a settling time of approximately 4 seconds. In Figure 5, a) linear and angular positions and b) error graphs obtained using the PSO-based optimal LQR control method of DIPSC are given.

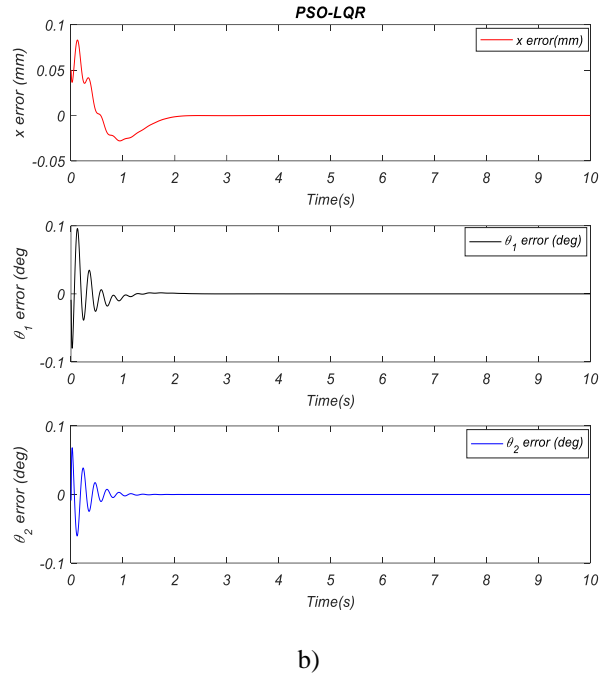
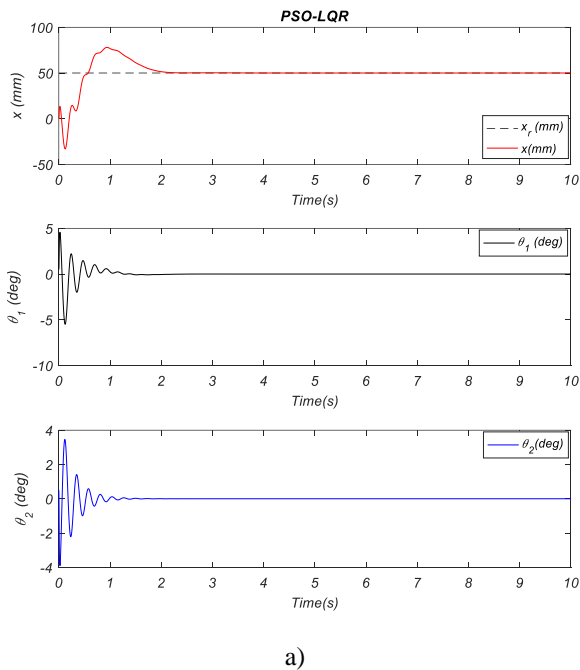
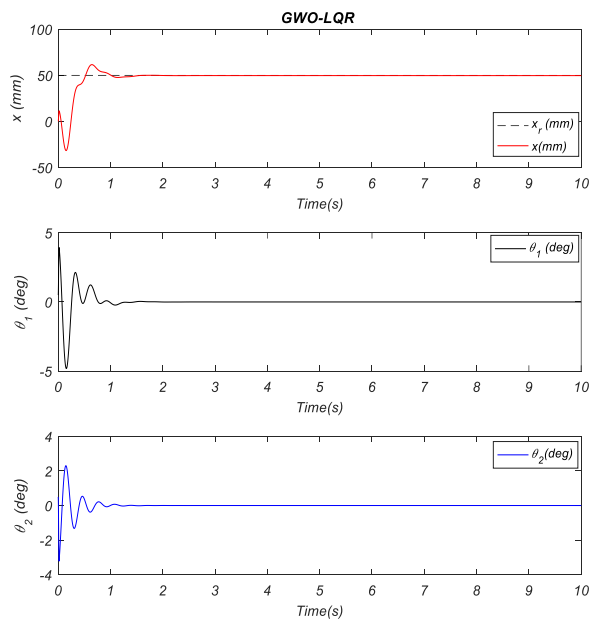


Figure 5. a) The linear and angular positions and b) the error graphs obtained using DIPSC's PSO-based optimal LQR control method

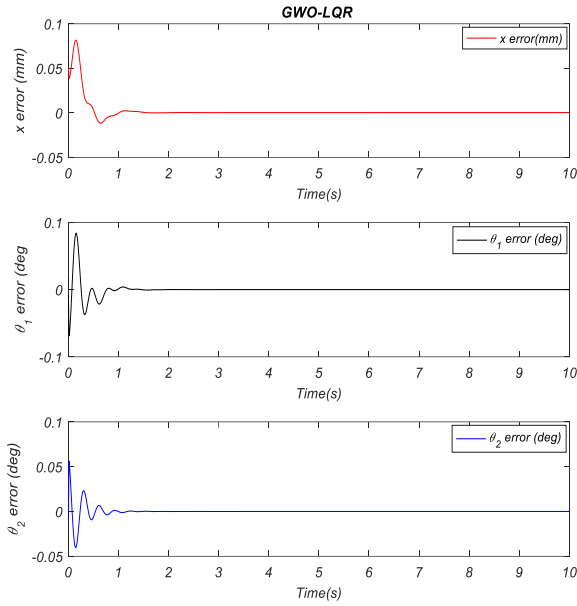
When Figure 5 is examined, it is seen in the graph obtained as a result of the use of the PSO-based optimal LQR control method, that the maximum overshoot in the system decreased slightly compared to the GA-based LQR method, but increased compared to the classical LQR method. However, it is seen that the cart reaches a settling time of approximately 2 seconds. In Figure 6, a) The linear and angular positions and b) error graphs obtained using the GWO-based optimal LQR control method of DIPSC are given.



a)



a)



b)

Figure 6. a) The linear and angular positions and b) the error graphs obtained using DIPSC's GWO-based optimal LQR control method

When Figure 6 is examined, it is seen in the graph obtained as a result of the use of the GWO-based optimal LQR control method that the maximum overshoot occurs in a very small amount in the system and that it is considerably reduced compared to all previous methods. It is seen that the cart reaches a settling time of approximately 1.4 seconds. Figure 7 is given the convergence graph.

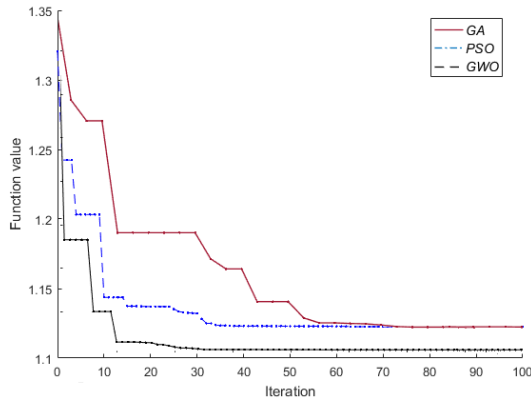


Figure 7. The convergence graph of optimization algorithms

When the convergence graph is examined, it is seen that the best convergence is achieved with the GWO algorithm and this is achieved in approximately 30 iterations. Similarly, it is seen that PSO reaches approximately 40 iterations and GA reaches approximately 75 iterations. Error results will be compared using the performance criteria given below.

$$MSE = \frac{1}{N} \left(\sum_j^N y_{d_j} - y_j \right)^2 \tag{17}$$

If the desired y_{d_j} robot's j . value is y_j then it represents the j . actual value of the robot. y represents the position of the cart or the angular positions of the pendulums. $j=1,2,3,4 \dots N$ is. Tables 1 a and b show the error results obtained by using MSE, which is the performance criterion of classical LQR, GA-based LQR, PSO-based LQR, and GWO-based LQR control methods.

Table 1. The performance comparisons of the linear and angular position tracking error (mm) using a) settling time and b) MSE

a) Settling time

Control type/ Criteria	LQR	GA-LQR	PSO-LQR	GWO-LQR
x	5	4	2	1.4
θ_1	2	2.5	1.8	1.5
θ_2	1.9	1.6	1.4	1.2

b) MSE

Control type/ Criteria	LQR	GA-LQR	PSO-LQR	GWO-LQR
x	$1.82 \cdot 10^{-3}$	$1.65 \cdot 10^{-4}$	$1.52 \cdot 10^{-4}$	$1.41 \cdot 10^{-4}$
θ_1	$1.18 \cdot 10^{-4}$	$2.14 \cdot 10^{-4}$	$9.12 \cdot 10^{-5}$	$9.56 \cdot 10^{-5}$
θ_2	$5.58 \cdot 10^{-5}$	$4.98 \cdot 10^{-5}$	$3.75 \cdot 10^{-5}$	$2.58 \cdot 10^{-5}$

According to the results of the performance error criteria (settling time and MSE-linear/angular position) obtained using the performance criteria in Tables 1a and b, the settling error performance for the classical LQR control method is 5 seconds. The Linear and angular position error values are $1.82 \cdot 10^{-3}$ mm, $1.18 \cdot 10^{-4}$ degrees, and $5.58 \cdot 10^{-5}$ degrees, respectively. According to the performance error criteria given in the table, the settling error performance obtained by using the GA-based LQR control method is 4 seconds. The linear and angular position error values are $1.65 \cdot 10^{-4}$ mm, $2.14 \cdot 10^{-4}$ degrees, and $4.98 \cdot 10^{-5}$ degrees, respectively. According to the performance error criteria given in the table, the settling error performance obtained by using the PSO-based LQR control method is 2 seconds. The linear and angular position error values are $1.52 \cdot 10^{-4}$ mm, $9.12 \cdot 10^{-5}$ degrees, and $3.75 \cdot 10^{-5}$ degrees, respectively. According to the performance error criteria given in the table, the settling error performance obtained by using the GWO-based LQR control method, which is the last method recommended, is 1.4 seconds. The Linear and angular position error values are $1.41 \cdot 10^{-4}$ mm, $9.56 \cdot 10^{-5}$ degrees, and $2.58 \cdot 10^{-5}$ degrees, respectively. Considering all the results obtained, the GWO-based LQR control method outperformed other methods in point of both settling time and MSE error criteria.

Conclusions

In this study, modeling and optimal control of a double-inverted pendulum system on a cart (DIPSC) were performed. The system was modeled using the Lagrange-

Euler method, and classical and optimal Linear Quadratic Regulator (LQR) control methods were utilized for the system's control. The Genetic Algorithm (GA), Particle Swarm Optimization (PSO), and Grey Wolf Optimization (GWO) algorithms were used to determine the vitally essential Q and R parameters of the LQR control method, one of the optimal control methods. The DIPSC system was controlled in the simulation environment by using classical LQR and optimal LQR methods. The results obtained by using the proposed methods the settling time and the Mean-Square-Error (MSE) performance criteria were compared and examined. Considering all the results obtained, the GWO-based LQR control method outperformed other methods in terms of both settling time and MSE error criteria. The physical parameters used in the method are the real parameters of real-time DIPSC systems. It will be of great advantage to use these real parameters during the experimental implementation of the method. In addition, in the simulation environment, the noise in the real environment is added to the control of the system. A 2nd order low pass filter is used to filter this noise. Also, the method can be developed using different optimization techniques and objective functions. In addition, the method can be developed and applications can be made in a real-time laboratory environment.

Ethics Committee Approval

There is no need to obtain permission from the ethics committee for the article prepared.

Conflict of Interest Statement

There is no conflict of interest with any person/institution in the article prepared.

References

- [1] M. McGrath, D. Howard and R. Baker, "The strengths and weaknesses of inverted pendulum models of human walking." *Gait & posture* vol. 41, no. 2, pp. 389-394, 2015.
- [2] Y. Fang, W. E. Dixon, D. M. Dawson and E. Zergeroglu, "Nonlinear coupling control laws for an underactuated overhead crane system." *IEEE/ASME transactions on mechatronics* vol. 8, no. 3, pp. 418-423, 2003.
- [3] X. Huang and C. Chen "Research and Implementation of Self-Balancing Obstacle Vehicle Based On the Principle of Flywheel Inverted Pendulum." *2021 3rd International Conference on Artificial Intelligence and Advanced Manufacture*. 2021, pp. 1070-1073.
- [4] C. He, K. Huang, X. Chen, Y. Zhang and H. Zhao, "Transportation control of cooperative double-wheel inverted pendulum robots adopting Udwadia -control approach." *Nonlinear Dynamics* vol. 91, no. 4, pp. 2789-2802, 2018.
- [5] H. Li, M. Zhihong and W. Jiayin, "Variable universe adaptive fuzzy control on the quadruple inverted pendulum." *Science in China Series E: Technological Sciences* vol. 45, no. 2, pp. 213-224, 2002.
- [6] K. Furuta, T. Okutani and H. Sone, "Computer control of a double inverted pendulum." *Computers & Electrical Engineering* vol. 5. no.1, pp. 67-84, 1978.
- [7] F. Cheng, G. Zhong, Y. Li and Z. Xu, "Fuzzy control of a double-inverted pendulum." *Fuzzy sets and systems* vol. 79, no. 3, pp. 315-321, 1996.
- [8] W. Zhong and H. Rock, "Energy and passivity based control of the double inverted pendulum on a cart." *Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Control Applications (CCA'01) (Cat. No. 01CH37204)*. IEEE, 2001, pp. 896-901.
- [9] A. Bogdanov, "Optimal control of a double inverted pendulum on a cart." *Oregon Health and Science University, Tech. Rep. CSE-04-006, OGI School of Science and Engineering, Beaverton, OR*, 2004.
- [10] D. Cheng-jun, D. Ping, Z. Ming-lu and Z. Yan-fang, "Double inverted pendulum system control strategy based on fuzzy genetic algorithm." *2009 IEEE International Conference on Automation and Logistics*. IEEE, 2009, pp. 1318-1323.
- [11] X. Xiong and Z. Wan, "The simulation of double inverted pendulum control based on particle swarm optimization LQR algorithm." *2010 IEEE International Conference on Software Engineering and Service Sciences*. IEEE, 2010, pp. 253-256.
- [12] C. W. Tao, J. Taur, J. H. Chang and S. F. Su, "Adaptive fuzzy switched swing-up and sliding control for the double-pendulum-and-cart system." *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)* vol. 40, no.1, pp. 241-252, 2009.
- [13] M. Adeli, H. Zarabadipour and M. A. Shoorehdeli, "Anti-swing control of a double-pendulum-type overhead crane using parallel distributed fuzzy LQR controller." *The 2nd International Conference on Control, Instrumentation and Automation*. IEEE, 2011, pp. 401-406.
- [14] I. Hassanzadeh, A., Nejadfard and M. Zadi, "A multivariable adaptive control approach for stabilization of a cart-type double inverted pendulum." *Mathematical Problems in Engineering* 2011 (2011).
- [15] N. Singh and S. K. Yadav, "Comparison of LQR and PD controller for stabilizing Double Inverted Pendulum System." *International Journal of Engineering Research and Development* vol. 1, no. 12, pp. 69-74, 2012.
- [16] J. L. Zhang and W. Zhang, "LQR self-adjusting based control for the planar double inverted pendulum." *Physics Procedia* vol. 24, pp. 1669-1676, 2012.
- [17] N. S. Bhangal, "Design and performance of LQR and LQR based fuzzy controller for double inverted pendulum system." *Journal of Image and Graphics* vol. 1. no. 3, pp. 143-146, 2013.
- [18] L. Wang, H. Ni, W. Zhou, P. M. Pardalos, J. Fang and M. Fei, "MBPOA-based LQR controller and its application to the double-parallel inverted pendulum

- system." *Engineering Applications of Artificial Intelligence* vol. 36, pp. 262-268, 2014.
- [19] Z. Sun, N. Wang, and Y. Bi, "Type-1/type-2 fuzzy logic systems optimization with RNA genetic algorithm for double inverted pendulum." *Applied Mathematical Modelling*, vol. 39, no. (1), pp. 70-85, (2015).
- [20] G. A. Sultan and Z. K. Farej, "Design and Performance Analysis of LQR Controller for Stabilizing Double Inverted Pendulum System." *Circ. Comput. Sci.* vol. 2, no. 9, pp.1-5, 2017.
- [21] N. Bandari, A. Hooshiar, M. Razdan, J. Dargahi and C. Su, "Stabilization of double inverted pendulum on a cart: LQR approach. Su, *International Journal of Mechanical and Production Engineering*, vol. 5, no. 2, 2017.
- [22] R. Banerjee, N. Dey, U. Mondal and B. Hazra, "Stabilization of double link inverted pendulum using LQR." *2018 International Conference on Current Trends towards Converging Technologies (ICCTCT)*. IEEE, 2018, pp. 1-6.
- [23] Ü. Önen, A. Çakan and I. İlhan, "Performance comparison of optimization algorithms in LQR controller design for a nonlinear system." *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences* vol. 27, no. 3, pp. 1938-1953, 2019.
- [24] B. He, S. Wang and Y. Liu, "Underactuated robotics: a review." *International Journal of Advanced Robotic Systems* vol.16, no.4, 1729881419862164, 2019.
- [25] T. M. Tijani and I. A. Jimoh, "Optimal control of the double inverted pendulum on a cart: A comparative study of explicit MPC and LQR." *Applications of Modelling and Simulation* vol.5, pp. 74-87. 2021.
- [26] G. S. Maraslidis, T. L. Kottas, M. G. Tsiouras and G. F. Fragulis, "Design of a Fuzzy Logic Controller for the Double Pendulum Inverted on a Cart." *Information* vol. 13, no. 8, pp. 379, 2022.
- [27] G. P. Gil, W. Yu and H. Sossa, "Reinforcement learning compensation based PD control for a double inverted pendulum" *IEEE Latin America Transactions*, vol. 17, no. 2, pp. 323-329, 2019.
- [28] N. Bu and X. Wang, "Swing-up design of double inverted pendulum by using passive control method based on operator theory" *International Journal of Advanced Mechatronic Systems*, vol. 10, no. 1, pp. 1-7, 2023.
- [29] J. He, L. Cui, J. Sun, P. Huang and Y. Huang, "Chaotic dynamics analysis of double inverted pendulum with large swing angle based on Hamiltonian function" *Nonlinear Dynamics*, vol. 108, no. 4, pp. 4373-4384, 2022.
- [30] L. Fan, A. Zhang, G. Pan, Y. Du, and J. Qiu, "Swing-up and fixed-time stabilization control of underactuated cart-double pendulum system" *IET Control Theory & Applications*, vol. 17, no. 6, pp. 662-671, 2023.
- [31] B. D. Anderson and J. B. Moore, *Optimal control: linear quadratic methods*. Courier Corporation, 2007.
- [32] T. Abut, "Modeling and optimal control of a DC motor." *Int. J. Eng. Trends Technol* vol. 32, no. 3, pp.146-150, 2016.
- [33] L. M. Argentim, W. C. Rezende, P. E. Santos and R. A. Aguiar, "PID, LQR and LQR-PID on a quadcopter platform." *2013 International Conference on Informatics, Electronics and Vision (ICIEV)*. IEEE, 2013, pp. 1-6.
- [34] S. N. Sivanandam and S. N. Deepa, *Genetic algorithms*. Springer Berlin Heidelberg, 2008, pp. 15-37.
- [35] T. Abut, "Dynamic Model and Optimal Control of A Snake Robot: TAROBOT-1." *International Journal of Scientific & Technology Research* vol. 4, no.11, pp. 4, 2015.
- [36] J. Kennedy and R. Eberhart, "Particle swarm optimization." *Proceedings of ICNN'95-international conference on neural networks*. vol. 4. IEEE, 1995, pp. 1942-1948.
- [37] Y. Shi, "Particle swarm optimization: developments, applications and resources." *Proceedings of the 2001 congress on evolutionary computation (IEEE Cat. No. 01TH8546)*. Vol. 1. IEEE, 2001, vol. 1, pp. 81-86.
- [38] S. Mirjalili, S. M. Mirjalili and A. Lewis, "Grey wolf optimizer." *Advances in engineering software* vol. 69 pp. 46-61, 2014.
- [39] T. Abut and S. Soyguder, "Optimal adaptive computed torque control for haptic-teleoperation system with uncertain dynamics." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering* vol. 236, no. 4, pp. 800-817, 2022.
- [40] H. Faris, I. Aljarah, M. A. Al-Betar and S. Mirjalili, "Grey wolf optimizer: a review of recent variants and applications." *Neural computing and applications* vol. 30, 413-435, 2018.



Reducing Speed Ripples and Vibrations in Permanent Magnet Synchronous Motors with Unbalanced Loads

Faruk ERKEN^{1*}, Oya FİDAN², Seçil KARATAY³

¹ Kastamonu University, Electrical-Electronics Engineering Department, ferken@kastamonu.edu.tr, Orcid No: 0000-0003-2048-1203

² Kastamonu University, Electrical-Electronics Engineering Department, oyakocaoqulu@gmail.com, Orcid No 0000-0003-2664-7796

³ Kastamonu University, Electrical-Electronics Engineering Department, skaratay@kastamonu.edu.tr, Orcid No 0000-0002-1942-6728

ARTICLE INFO

Article history:

Received 13 March 2023

Received in revised form 22 March 2023

Accepted 23 March 2023

Available online 20 June 2023

Keywords:

Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM), speed ripples, harmonic injection, unbalanced load

ABSTRACT

Permanent Magnet Synchronous Motors (PMSM) have important features such as high torque, high power density, high acceleration, small volume, low noise and high efficiency. With these features, is widely used in the industry. One of the negativities that occur during the operation of electric motors is speed fluctuations and vibrations due to the unbalanced loads. Unbalanced loading can be caused by the character of the load, as well as the poor mounting of the motor to the load, the misalignment on the shaft and the load itself being an eccentric load. Especially at high speeds, this causes permanent damage to the motors. Specification and elimination of these fluctuations, which occur for different reasons, are very important for a reliable operation. In this study, unbalanced load situations are investigated in an unbalanced PMSM and the speed ripples in the unbalanced load of the motor are attempted to be decreased by the proposed Adaptive Harmonic Injection approach. The simulation is carried out under various operating conditions by abruptly and linearly changing the motor speed under unbalanced load. It is observed that speed fluctuations in the motor can be effectively suppressed under different operating condition.

Doi: 10.24012/dumf.1264630

* Corresponding author

Introduction

High torque, high power density, quick acceleration, small volume, low noise, and high efficiency are some of the key characteristics of Permanent Magnet Synchronous Motors (PMSM). With these features, PMSMs are widely used in the industry [1, 2]. Axial misalignment, speed ripples, and vibrations brought on by unbalanced loads are some of the drawbacks of using electric motors. Unbalanced loading can be caused by the character of the load, as well as the poor mounting of the motor to the load, the misalignment on the shaft and the load itself being an eccentric load. Especially at high speeds, this causes permanent damage to the motors. Specification and elimination of these fluctuations, which occur for different reasons, are very crucial for a reliable operation. The speed ripples in unbalanced loaded motors are attempted to be decreased by the proposed Adaptive Harmonic Injection (AHI) approach in this study that investigates the unbalanced load conditions in an unbalanced PMSM.

Imbalances in the rotor in electrical machines are mostly caused by eccentricity, shaft misalignment, bearing failures and unbalanced loads [3, 4]. During the rotation, this imbalance causes a variation in centrifugal force on the rotor or the movement of the center of mass in the rotor

away from the center of rotation. This causes vibration in the motor. One of the most important fault in rotating machines is axial misalignment in electric motors. The air gap between the stator and rotor is not equally distributed when the motor is out of alignment. Misalignment in the motor causes problems such as the increase in the amplitudes of the harmonic components of the flux density in the air gap, fluctuation in speed and torque, decrease in the average value of the torque, decrease in efficiency due to the increase in losses, heating of the motor and increase in noise.

In the literature, there are different studies conducted by researchers on the unbalanced load caused by axial misalignment in motors. [5] have presented a method to simulate the air gap eccentricity in induction machines. The geometry and winding configuration of the machine have been used to compute the motor parameters. Thus, the calculated machine inductances have involved the effect of eccentricity in this study. In [6], a real-time PMSM drive system platform is used to test the control algorithm in order to reduce motor vibration. They have concluded that the vibrations in the different motor speed have decreased by the proposed controlled strategy. A PMSM drive systems, the evaluation of a compact imbalance technique is suggested in [7]. In this study, a filter is merged with an

open-loop torque observer and an imbalance estimator to predict the unbalance. [8] estimated static eccentricity, dynamic eccentricity and mechanical eccentricity in three-phase PMSMs using Artificial Neural Networks (ANN). The simulated current is given a white Gaussian noise addition, and it is concluded that the sideband frequency is created in the current and voltage spectra by the eccentricity defect in the PMSM. In [9], stator current has been used to estimate the amount of eccentricity occurring in the Brushless DC Motor. The Morlet main function has been used to detect whether there is any misalignment. The experiment has been validated by FFT. In [10], it has been suggested that model predictive control and iterative learning control be combined to speed up the system's response time and significantly lessen speed ripples. The obtained results confirm the effectiveness of the model predictive control and iterative learning control scheme. In [11], it has been recommended to use the virtual cogging torque control method to suppress the direct-drive PMSM servo system's speed ripple at low speeds. This study has shown that the control mechanism utilized to smooth the speed during low-speed operations is facile and efficient. Unbalanced loads encountered in motors are mostly caused by misalignment, curvature of the shaft or loading the motor with an unbalanced load. In misalignment, the air gap is not evenly distributed [12]. Axial misalignment is examined in three categories as static misalignment, dynamic misalignment and mixed misalignment. The unbalanced load caused by the load imbalance occurs when the center of gravity in the motor is different from the center of rotation. Vibrations occur as a result of oscillation at the moment of equilibrium. The rotor or mechanical load imbalance generates vibration at high speeds due to a bearing or shaft defect, which can cause mechanical failure. The degree of rotating unbalance must be determined in real-time in order to prevent malfunction and reduce mechanical vibration. One of the methods used in PMSM to reduce speed fluctuations caused by eccentricity and load imbalance is harmonic current injection. Speed fluctuations encountered in motors are generally periodic. Therefore, speed fluctuations can be reduced by injecting current harmonics with suitable amplitude and frequency into the motor [1]. In this study, speed fluctuations brought on by unbalanced loads are reduced using the Adaptive Harmonic Injection (AHI) method. The decision values of the various sub-data are linearly combined to form the basis of the AHI algorithm. In an active coupling approach based on vertical projections on the convex set defining these values, the decision values are linearly combined with online-updated weights. The algorithm and the results are presented in sections 2 and 3, respectively.

Dynamic Model of PMSM under Unbalanced Load

One of the conditions that cause the unbalanced operation of the motor in PMSMs is axial eccentricity. Eccentricity faults can occur in three different situations: Static Eccentricity (SE), Dynamic Eccentricity (DE), and Mixed Eccentricity (ME). SE is a steady amount of shift of the rotor on the vertical or horizontal axis. The minimum air

gap that occurs in axial misalignment does not change with time. It creates a constant thrust in the direction of the small air gap. In DE, unlike SE, the position of the rotor and the air gap are not fixed due to the rotation of the rotor around the rotation axis of the stator. These two situations concurrence in ME [13]. Pulsating radial electromagnetic forces are caused by eccentricity's induction of an imbalanced magnetic attraction. As a consequence of that, additional frequency components are occurred into the current spectrum. The following is an expression for these induction motor frequency components:

$$f_{eh} = \left[(kR \mp n_d) \left(\frac{1-s}{p} \right) \mp v \right] f_e \quad (1)$$

Here n_d and k are integer and in case of SE n_d taken as zero. R is total slot number and s is slip in the formula. Both of them is taken as zero in PMSM. v is the odd numbered supply harmonics in the supply frequency p indicates the number of pole pairs. Thus, in case of ME, harmonic components can be represented as follows [14]:

$$f_{eh} = f_e \mp k(1/p)f_e \quad (2)$$

The mechanical system can be simulated as illustrated in Fig. 1 in order to analyze the mechanical and electrical phenomena of the PMSM drive with a mechanical unbalance [7]. A mass of total unbalance (m_u) can be used to express both the rotor unbalance of a PMSM and the load unbalance of a mechanical system, such as a dynamic eccentricity. The unbalanced mass m_u and the gravitational acceleration g produce a gravitational force. When it acts at a distance e from the center of the rotating parts, gravitational force generates a torque that is in the opposite direction of rotation. The torque depends on mechanical rotor position θ_{rm} and mechanical rotor speed ω_{rm} .

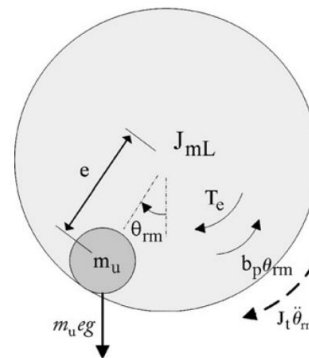


Figure 1. Rotational unbalanced model of the motor [7]

The free body diagram for the rotational model, demonstrated in Fig. 1, is used to calculate the equation of motion (Eq. 3) for rotational dynamics under the assumption that the mechanical system with unbalance is mounted horizontally along its rotating axis..

$$J\dot{\omega}_{rm} + B\omega_{rm} = T_e - m_u g \sin \theta_{rm} \quad (3)$$

where J is the total moment of inertia, B is the coefficient of friction and T_e is the induced electromagnetic torque of motor. Harmonics in the motor phase currents are caused by the unbalance's electromagnetic torque.

The stator current's harmonic components have revealed a dynamic eccentricity, such as an unbalance. Current

harmonics occurring in unbalanced loading are as defined for ME in Eq. 2. Electromagnetic torque can be defined as in Eq. 4 for PMSM:

$$T_e = \frac{3}{2} p \lambda_m i_q \quad (4)$$

The electromagnetic torque T_e (Eq. 4) is substituted into the load torque (Eq. 2) to produce the unbalanced q-axis current at an exact constant speed by ignoring friction and moments of inertia as follows:

$$i_q = \frac{2}{3p\lambda_m} (m_u e g \sin \theta_{rm}) \quad (5)$$

As can be seen from Eq. 5, oscillations occur due to unbalanced load depending on θ_{rm} .

The Adaptive Harmonic Injection Algorithm

In unbalanced loaded PMSMs, torque fluctuations vary periodically according to rotor position and appear as speed fluctuations. Thus, injecting the proper current harmonics into the motor is one of the most effective ways to reduce speed fluctuations. According to Eq. 2, fluctuations caused by unbalanced load in PMSM occur in mechanical rotor frequency. Therefore, ripples can be reduced by injecting harmonic currents at this frequency into the motor. The harmonic to be injected can be expressed as in Eq. 6 [1]:

$$x_h = x_m \sin(h\theta + \phi) \quad (6)$$

In the above equation, h is the harmonic order, x_m is the amplitude of the injected harmonic and ϕ is the phase angle.

$$x_m \sin(h\theta + \phi) = x_m [\sin(h\theta) \cos(\phi) + \sin(\phi) \cos(h\theta)] \quad (7)$$

Here, if w_1 is written instead of $x_m \cos(\phi)$ and w_2 is written instead of $x_m \sin(\phi)$, Eq. 8 is obtained as follows:

$$x_m \sin(h\theta + \phi) = w_1 \sin(h\theta) + w_2 \cos(h\theta) \quad (8)$$

Any harmonic order can produce a harmonic component with the required amplitude and phase if the sine and cosine terms are weighted with the proper values. Appropriate values are called as weights. The weight values are determined by the Adaptive Harmonic Injection (AHI) technique. The Normalized Least Mean Square (NLMS) technique is used to update the weights. The main drawback of the pure LMS algorithm is its sensitivity to the scale of its input $X(n)$. Because of this, choosing a learning rate μ that assures algorithm stability is very difficult [15]. By normalizing with the input's power, the NLMS, a variation of the LMS algorithm, resolves this issue.

In order to express this idea mathematically, let $\hat{w}(n)$ stand for the filter's old weight vector at adaptation cycle n and $\hat{w}(n+1)$ for its updated weight vector at adaptation cycle $n+1$.

$$\hat{y}(n) = X^T(n)w(n) = \sum_i w_i(n)X_i(n) \quad (9)$$

Here $\hat{y}(n)$ is an estimate of the weighted component $y(n)$ of any harmonic in step n and the error vector can be written as follow:

$$e(n) = y(x, n) - \hat{y}(x, n) \quad (10)$$

The Mean Square Error is minimized in order to update the weights.

$$\min_{w_i} E[(y(n) - \hat{y}(n))]^2 \quad i=1, \dots, N \quad (11)$$

Here E is the expectation operator. If the derivative of the weight is taken and set to zero:

$$\frac{\delta E}{\delta w} = -2E[(y(n) - \hat{y}(n))X_i(n)] = -2E(e(n)X_i(n)) \quad i = 1, \dots, N \quad (12)$$

$$-2E(e(n)X_i(n)) = 0 \quad i = 1, \dots, N \quad (13)$$

When the Wiener solution is applied to the N equation group and the necessary adjustments are made, an equation is obtained as in the NLMS algorithm. In this equation μ is the update rate.

$$w(n+1) = w(n) + \mu \frac{e(n)}{\|H(n)\|^2} H(n) \quad (14)$$

This algorithm's primary benefit over competing approaches is that it includes a controlled feedback mechanism that depends on the error term. Eq. 14 describes an online, controllable, and quick adaptive method for adjusting harmonic weights.

Simulation Results

The simulation of PMSM control using Field Oriented Control (FOC) is applied as the initial step of the study. Table 1 provides information on the motor's parameters in the simulation. The sampling time T_s is $2e-5$ s and the DC link voltage of the inverter is 100 V in the simulation.

Table 1. Motor parameters

Rated power	4 kW
Rated speed	2000 rpm
Armature resistance	0.0485 Ω
Armature inductance	0.000395 H
Number of poles	4

First, the effectiveness of the AHE method is investigated by making up the unbalanced load model of PMSM with equations (4) and (5). In the calculation, unbalanced loads are approximately $5 \sin \theta_{rm}$ Nm. In Fig. 2, the simulation results are given for 300 rad/s speed, both 5 Nm constant and 5 Nm unbalanced loads. While speed is fluctuating between 255 and 305 rad/s, with the applying of the method in $t = 2$ s, the fluctuations caused by unbalanced load have been removed.

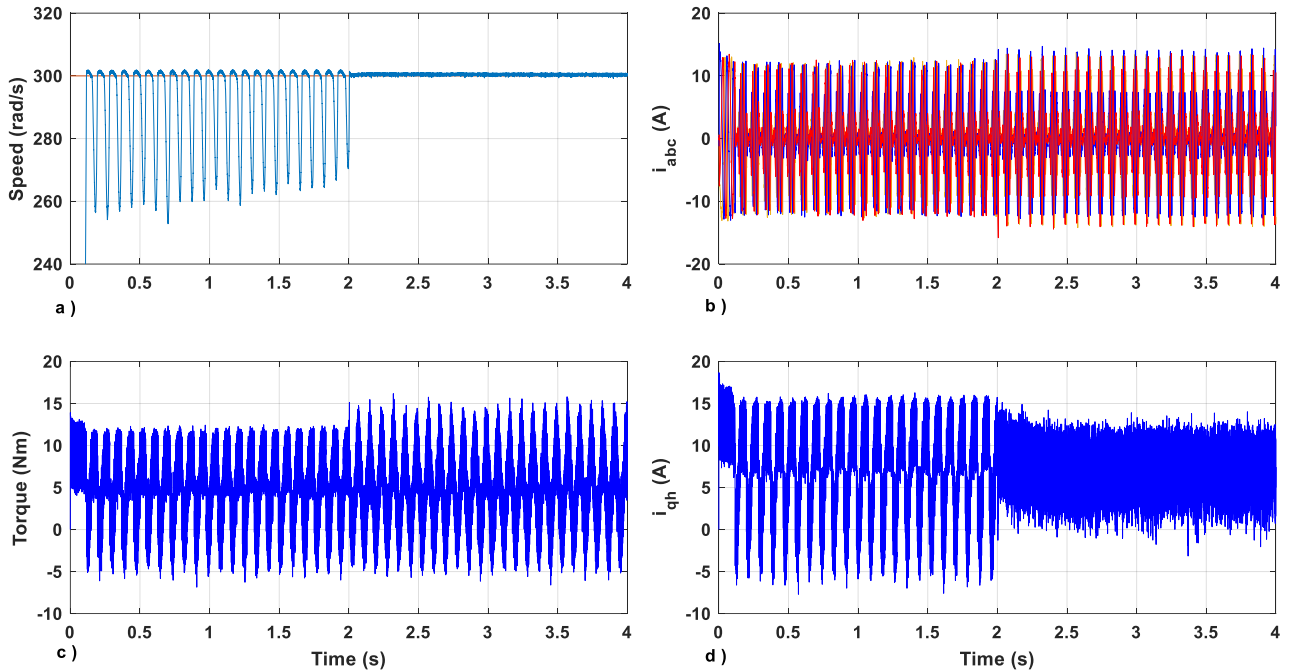


Figure 2. a) Motor speed b) Phase current c) Motor torque d) Harmonic injected iq current

In Fig. 3, FFT analysis are given in cases where the method is applied and not. Top side figures represent that the method is not active and bottom side figures represent that the method is active. In the FFT analysis of the motor speed,

it is observed that harmonics in 12 Hz and multiples with motor mechanical frequency are removed when the method is activated. It is also observed that side-band harmonics are removed in the torque FFT analysis.

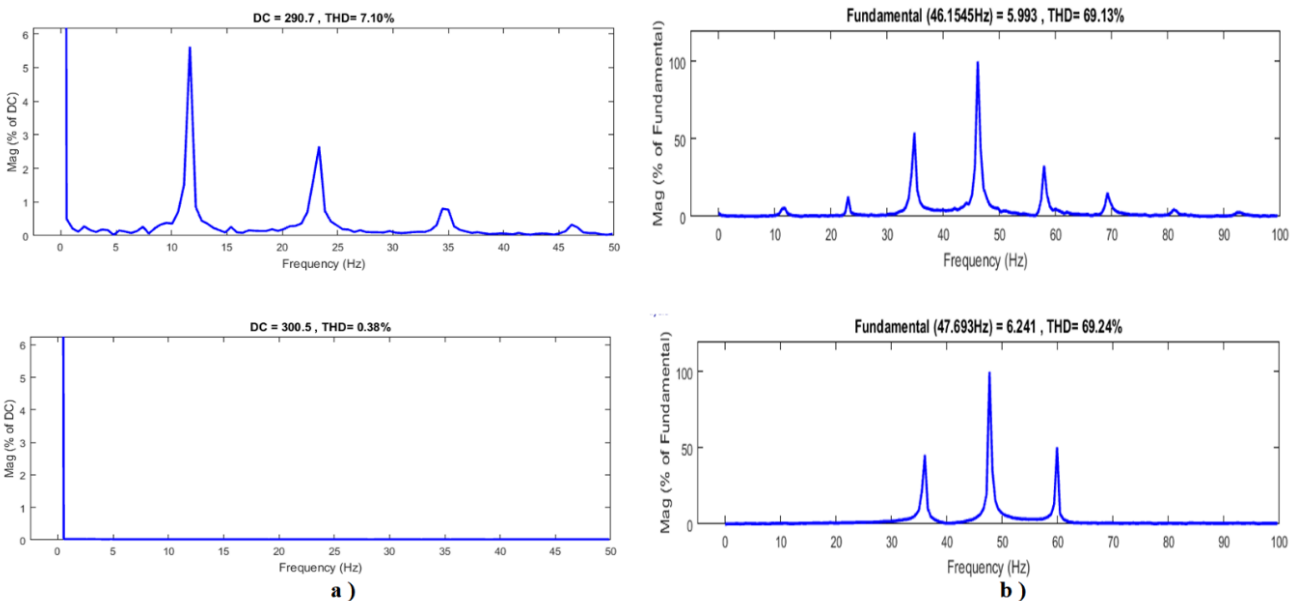


Figure 3. a) Motor speed FFT analysis and b) motor torque FFT analysis

In order to test that the proposed method is adaptable, the motor at a constant speed of 200 rad/s is loaded with unbalanced load between $t=1$ s and $t=2$ s. As shown in Fig.

4, there is no impact on the speed when the unbalanced load enabled and disabled abruptly.

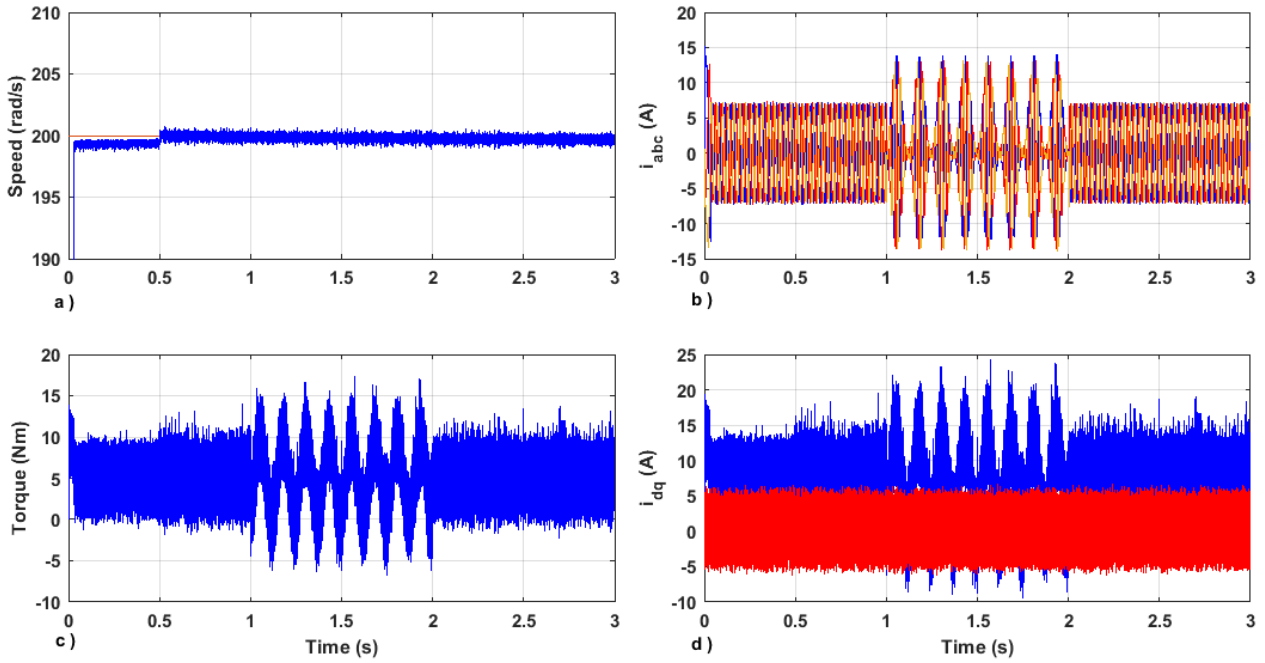


Figure 4. a) Motor speed b) Phase current c) Motor torque d) idq current

Fig. 5 shows the simulation results regarding the linear change of the speed between 100 rad/s and -200 rad/s at $T_y=5$ Nm constant and 5 Nm unbalanced load. In the study, the effectiveness of the method in reducing the speed fluctuations in case of changing the rotation direction of the motor under unbalanced load is investigated. With the

commissioning of the method at $t=1$ s, it has also been observed that the method eliminates the fluctuations in case the rotation direction changes and the motor speed follows the reference speed.

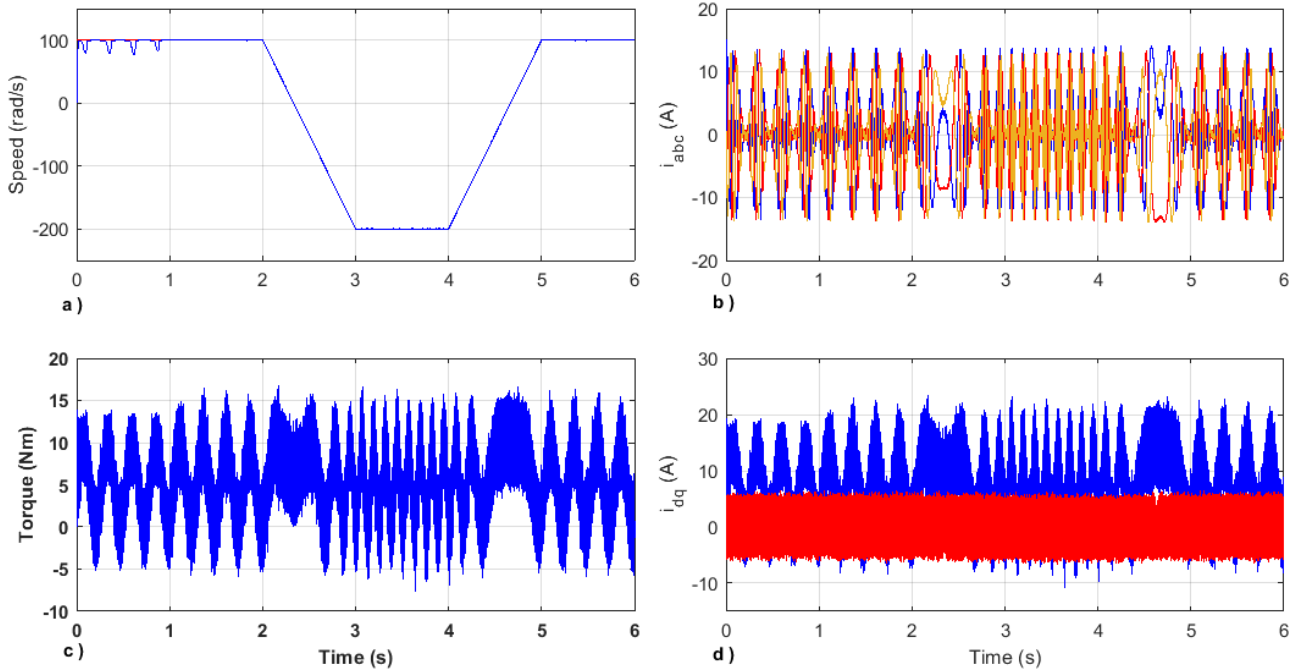


Figure 5. a) Motor speed b) Phase current c) Motor torque d) idq current

In another study, the results of the abrupt change of the speed at 100 rad/s, 200 rad/s and 300 rad/s in $T_y=5$ Nm constant and 5 Nm unbalanced load are given in Fig. 6.

With the activation of the method at $t=1$ s, the speed ripples are eliminated, and no speed ripples occurred when the speed changed abruptly.

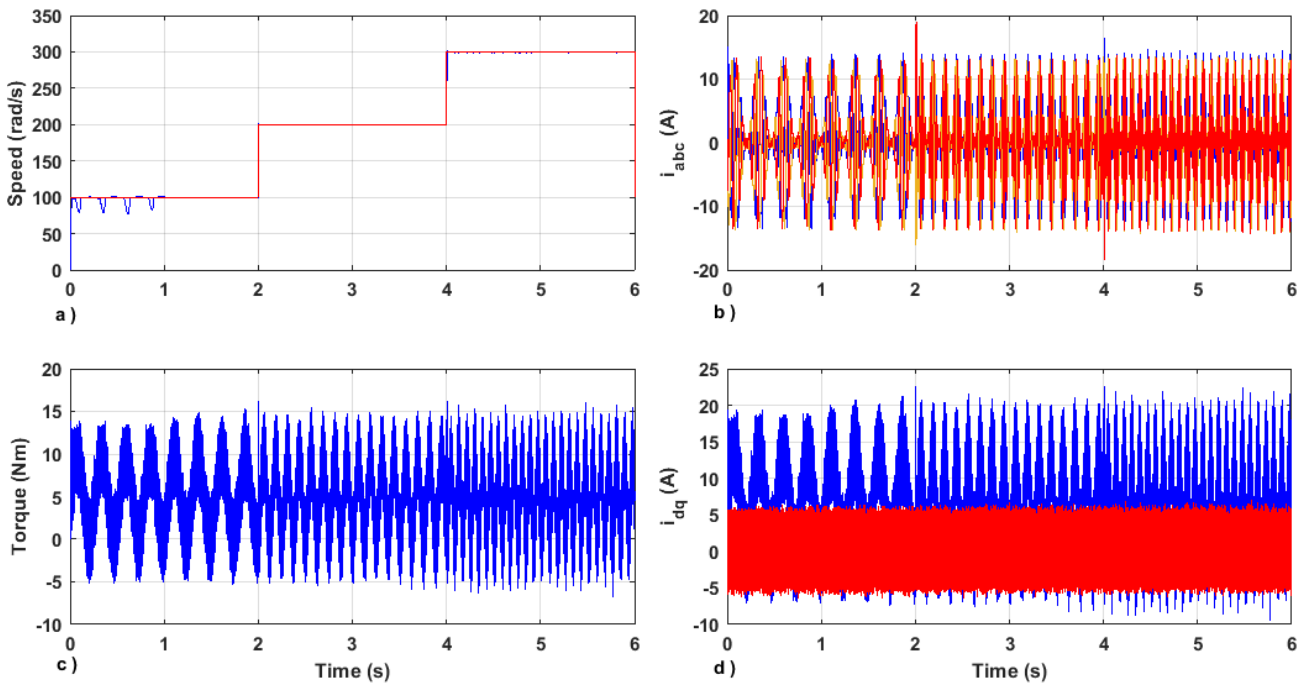


Figure 6. a) Motor speed b) Phase current c) Motor torque d) idq current

Finally, the simulation results regarding the activation of an unbalanced load of 2.5 Nm at $t=1$ s and 5 Nm at $t=2$ s at 200

rad/s speed and $T_y= 5$ Nm constant torque are given in Fig.7.

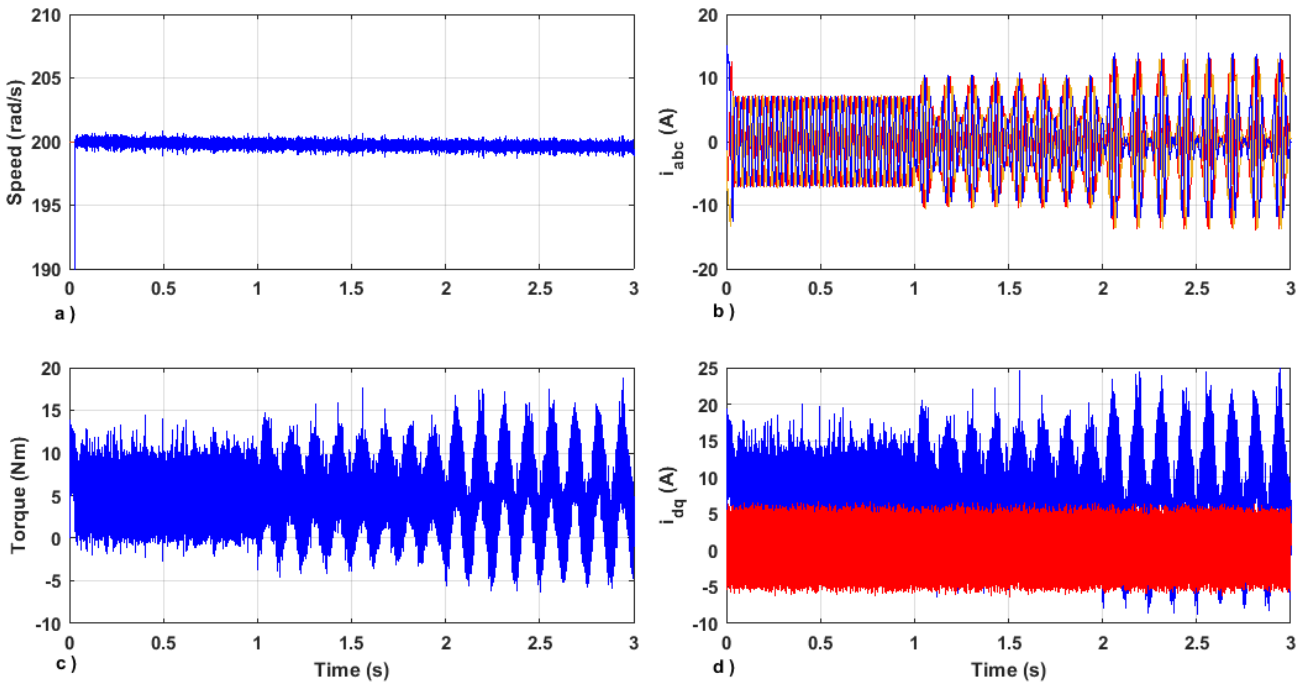


Figure 7. a) Motor speed b) Phase current c) Motor torque d) idq current

When the variation of the speed is examined, there is no fluctuation in the speed in case of unbalanced loads. It is observed that the current and torque changes are correlated with change in the load. The results show that the applied AHE method is effective in reducing speed fluctuations brought on by an unbalanced load and that the method is

adaptive to variation in speed and load during motor operation.

Conclusions

In unbalanced loaded electric motors, speed and torque fluctuations occur, resulting in harmonics in motor currents.

This can cause permanent damage to the machine. The resulting fluctuation generally occurs at the frequency and multiples of the mechanical speed of the motor. In this study, unbalanced loads encountered in electrical machines are analyzed, speed fluctuations occurring in PMSM under unbalanced load are determined and a method is proposed to reduce these fluctuations. The proposed AHE method is based on the Normalized LMS algorithm. Simulation studies are carried out by creating an unbalanced load model of the motor and applying Field Oriented Control to the motor. In the study, the speed of the motor is changed abruptly and linearly, and the unbalanced load is activated

and deactivated during the operation. Even in these cases, speed fluctuations in the motor are effectively suppressed. As a result, it has been observed that the proposed AHE method effectively reduces the speed fluctuations in case of unbalanced load, and the method is also adaptively effective in case of possible variation in the motor speed and load during the operation of the motor.

Authors' Contributions

We declare that all Authors equally contribute.

References

- [1] F. Erken, E. Oksuztepe and H. Kurum, "Online adaptive decision fusion based torque ripple reduction in permanent magnet synchronous motor," *IET Electric Power Applications*, vol. 10, no. 3, pp. 189-196, 2016.
- [2] T. Lale and B. Gumus, "A New Approach based on Electromechanical Torque for Detection of Inter-Turn Fault in Permanent Magnet Synchronous Motor," *Electric Power Components and Systems*, vol. 49, no. 18-19, p. 1499–1511, 2022.
- [3] S. Rajagopalan, W. I. Roux, T. G. Habetler and R. G. Harley, "Dynamic Eccentricity and Demagnetized Rotor Magnet Detection in Trapezoidal Flux (Brushless DC) Motors Operating Under Different Load Conditions," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 22, no. 5, pp. 2061-2069, 2007.
- [4] M. Salah, K. Bacha and A. Chaari, "Stator Current Analysis of a Squirrel Cage Motor Running Under Mechanical Unbalance Condition," in *10th International Multi-Conferences on Systems, Signals & Devices 2013*, Hammamet, Tunisia, 2013.
- [5] H. Toliyat, M. Arefeen and A. Parlos, "A method for dynamic simulation of air-gap eccentricity in induction machines," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 32, no. 4, pp. 910-918, 1996.
- [6] H. Zhang, R.-x. Zhao, M.-l. Zhu, H. Omori, H. Kohso and K. Gamo, "A novel control strategy for vibration reduction in the permanent magnet motor drive system with eccentric load," in *2008 International Conference on Electrical Machines and Systems*, Wuhan, 2008.
- [7] H. Kim, "On-line mechanical unbalance estimation for permanent magnet synchronous machine drives," *IET Electric Power Applications*, vol. 3, no. 3, pp. 178-186, 2008.
- [8] B. M. Ebrahimi, J. Faiz and M. J. Roshtkhari, "Static-, Dynamic-, and Mixed-Eccentricity Fault Diagnoses in Permanent-Magnet Synchronous Motors," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 56, no. 11, pp. 4727-4739, 2009.
- [9] T. Ishikawa, R. Toyota, M. Matsunami, N. Kurita and T. Matsuura, "Current-based detection of eccentric load coupled to brushless DC motor," in *The 2010 International Power Electronics Conference*, Sapporo, 2010.
- [10] Q. Fei, Y. Deng, H. Li, J. Liu and M. Shao, "Speed Ripple Minimization of Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Model Predictive and Iterative Learning Controls," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 31791-31800, 2019.
- [11] F. Bu, Z. Yang, Y. Gao, Z. Pan, T. Pu, M. Degano and C. Gerada, "Speed Ripple Reduction of Direct-Drive PMSM Servo System at Low-Speed Operation Using Virtual Cogging Torque Control Method," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 68, no. 1, pp. 160-174, 2021.
- [12] P. Vas, Parameter Estimation, Condition Monitoring, and Diagnosis of Electrical Machines, Oxford: Clarendon Press, 1993.
- [13] Z. Dogan, B. Kara, C. Emeksiz and L. Gokrem, "The Static Eccentricity Fault Diagnosis in Time Domain at Line Start Permanent Magnet Synchronous Motor," *Journal of New Results in Science*, vol. 5, no. 12, pp. 88-95, 2016.
- [14] R. S. C. Pal ve A. R. Mohanty, «A Simplified Dynamical Model of Mixed Eccentricity Fault in a Three-Phase Induction Motor,» *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, cilt 68, no. 5, pp. 4341-4350, 2021.
- [15] S. Haykin, Adaptive Filter Theory, Upper Saddle River,NJ: Prentice Hall, 2002.



Research Article

Compare the classification performances of convolutional neural networks and capsule networks on the Coswara dataset

Abdulaziz Muhammad^{1*}, Muhammet Ali Arserim², Ömer Türk³

¹ Dicle Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, hassan.f.o@hotmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0673-1408>

² Dicle Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, marserim@dicle.edu.tr, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9913-5946>

³ Mardin Artuklu Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, omerturk@artuklu.edu.tr, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0060-1880>

ARTICLE INFO

Article history:

Received 24 March 2023
Received in revised form 24 April 2023
Accepted 25 April 2023
Available online 20 June 2023

Keywords:

COVID-19, CNN, CapsNet,
k-fold, leave-one-out

Doi: 10.24012/dumf.1270429

* Corresponding author

ABSTRACT

Since the beginning of the COVID-19 pandemic, researchers have developed numerous machine learning models to distinguish between positive and negative COVID-19 sounds. The aim of this study is to compare the classification performances of convolutional neural networks (CNN) and capsule networks (CapsNet) on the Coswara dataset, which includes 1404 healthy subjects and 522 COVID-19 positive subjects, each containing nine different types of sounds. The dataset was preprocessed by using oversampling and normalization techniques after feature extraction. k-fold cross-validation was used (where k=10) to train and evaluate the models. The CNN classifiers achieved a 94% ACC, while the CapsNet classifiers achieved an 90% ACC.

Furthermore, when using leave-one-out cross-validation, the CNN classifier achieved an ACC of 99%. We also compared the performance of the CNN and CapsNet networks on the Coswara dataset without preprocessing. Without oversampling techniques, the CNN classifiers achieved an 93% ACC, compared to 54% for the CapsNet classifiers. When normalization techniques were not applied, the CNN classifiers achieved an 86% ACC, while the CapsNet classifiers achieved a 26% ACC.

Introduction

COVID-19 is caused by the highly contagious SARS-CoV-2 virus [1]. Many people get infected and recover without the need for special medical care, but the elderly and people with cancer and chronic respiratory diseases can experience serious complications. As of February 21, 2023, there were reportedly (757,264,511) confirmed cases and (6,850,594) confirmed deaths of COVID-19 globally [1]. Most common symptoms are fever (98.6%), cough (59.4%), tiredness (69.6%), and loss of taste or smell [1,2].

The COVID-19 pandemic has had a significant impact on the world, and one of the biggest challenges has been accurately detecting the virus in patients. Deep learning techniques, such as convolutional neural networks and recurrent neural networks, have been used in COVID-19 detection to improve accuracy and speed up the process. These deep learning models can analyze medical images, such as X-rays and CT scans, to identify COVID-19 pneumonia patterns. They can also process audio samples of coughs to detect COVID-19 sounds. With the help of large datasets and advanced machine learning algorithms, these models can achieve high accuracy rates in detecting COVID-19.

Several studies have been conducted using artificial intelligence to aid in the detection and diagnosis of COVID-

19 based on chest X-ray and CT scan images. For example, COVID-19 was detected from chest X-ray images using a CoroNet, a Deep Convolutional Neural Network with 89.6% accuracy [3]. The ResNet50 architecture achieved 96.23% accuracy using computed tomography (CT) images [4]. Many studies utilized small data sets, and it should be noted that codes and data are unavailable for several studies. This poses difficulties in assessing the efficacy of the methods in clinical settings [5].

Other studies have used cough sounds to detect COVID-19. For example, Bagad et al. achieved 72% accuracy using the ResNet18 architecture [6]. Pahar et al. reported achieving 98% accuracy using the ResNet50 architecture with leave-one-out cross-validation, as well as 73%, 81%, 89%, 95%, and 94% accuracy with the Logistic regression (LR), support vector machines (SVM), multilayer perceptrons (MLP), convolutional neural networks (CNN), and long-short term memory (LSTM) architectures, respectively [7]. Aly et al. achieved 96% accuracy using simple binary classifiers by averaging the predictions of multiple models trained and evaluated separately on different sound types, such as cough, breathing, and speech [8].

Convolutional neural networks (CNN) and capsule networks (CapsNet) are two popular types of neural networks that have been widely used in image and sound recognition tasks. In particular, researchers have developed

numerous machine learning models to distinguish between positive and negative COVID-19 sounds since the onset of the COVID-19 pandemic. The aim of this study is to compare the classification performances of CNN and CapsNet on a COVID-19 sound dataset called Coswara. By evaluating the performance of these two types of neural networks on the same dataset, this study aims to shed light on their respective strengths and weaknesses in detecting COVID-19 sounds.

Convolutional Neural Networks (CNN) is a feedforward artificial neural network consisting of layers. In general, a CNN structure comprises convolutional, pooling, and activation layers. CNN transmits the important weight values it has obtained to other layers. The pooling layer in the CNN structure reduces the data through downsampling. However, this can result in the loss of features such as depth and angle of the obtained features relative to each other. To preserve these properties, capsule neural networks (CapsNet) that use a dynamic routing algorithm are recommended. One of the most important goals of this study is to compare the classification performance of these two architectures

The aim of this study is to compare the effectiveness of simplified versions of convolutional neural networks (CNN) and capsule networks (CapsNet), while also examining the impact of preprocessing and cross-validation

techniques on both. The goal of this study is to understand the strengths and weaknesses of each neural network when applied to the Coswara dataset. As neural networks are increasingly popular in various applications, it is crucial to compare their performance and identify their optimal use cases to advance the field of machine learning.

Coswara dataset was used because it is diverse and available online [9]. The Coswara dataset is a collection of audio recordings that includes sounds from healthy individuals and those diagnosed with COVID-19. It consists of nine distinct sound types, such as coughing, breathing, and vowel sounds. The dataset has been widely used by researchers to investigate the potential of machine learning algorithms for COVID-19 detection. The sound of coughing was also utilized to extract features, and we applied preprocessing techniques to train both CNN and CapsNet to compare their performances.

Material and methods

In this section, we will mention the dataset in detail and methods used in the study. Figure 1 shows the flow chart of the model that we followed. The dataset was cleaned to remove empty and too-short audio files. Features were extracted, and preprocessing techniques like SMOTE and Normalization was applied, followed by the application of the Convolutional Neural Network (CNN) and capsule network (CapsNet).

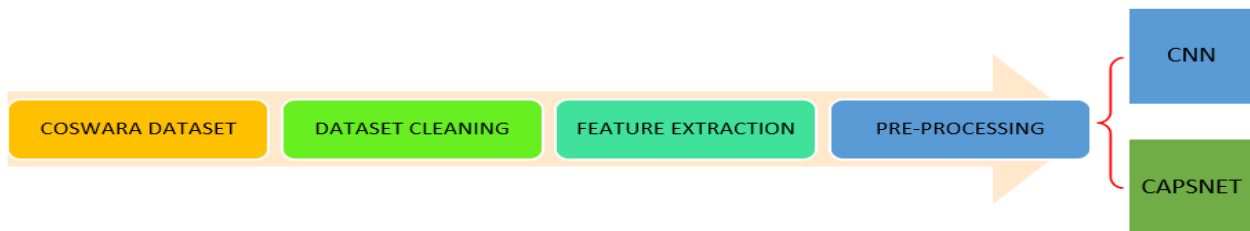


Figure 1. flow chart of the model

Dataset

This study utilized the Coswara dataset, which was curated by the Indian Institute of Science (IISc) [10]. The dataset consists of audio recordings from both healthy individuals and those diagnosed with COVID-19. Each audio sample

contains nine distinct types of sounds, including cough-heavy, cough-shallow, breathing-deep, breathing-shallow, counting-fast, counting-normal, and three vowel sounds: “a”, “e”, and “o”. Table 1 presents the different types of COVID-19 cases within the dataset.

The dataset contains (1,404) healthy cases, and those who were diagnosed with COVID-19 were divided according to

symptoms into three categories: positive_mild (325), positive_moderate (127), and positive_asymp (70). All three categories were collected during feature extraction. Thus, the total number of cases in the dataset is (522) infected with COVID-19 compared to (1,404) healthy cases. The imbalance between the number of healthy cases and COVID-19 cases in the dataset can lead to biased training results [7]. This is because the model may tend to predict the majority class (healthy cases) more frequently, leading to lower accuracy in predicting the minority class (COVID-19 cases). To address this issue, we applied the Synthetic Minority Oversampling Technique (SMOTE) [11]. In addition, we used the normalization technique to reduce overfitting and improve accuracy. For this purpose, we used the Scikit-learn Python library [12].

Table 1 covid-19 cases	
Covid-19 cases	Numbers of samples
healthy	1404
positive_mild	325
no_resp_illness_exposed	192
resp_illness_not_identified	153
positive_moderate	127
recovered_full	103
positive_asymp	70
Total	2374

Feature extraction

To extract features from the audio files, we utilized the librosa Python package [13] to compute Mel-frequency cepstral coefficients (MFCCs). Before feature extraction, we resampled the raw audio samples to 22.50 kHz. Figure 2 provides a visual representation of the feature extraction process.

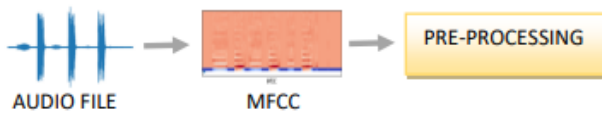


Figure 2 feature extraction

Convolutional Neural Network

CNNs are a class of deep neural networks that are commonly used for image and video recognition, classification, and segmentation tasks. In a CNN, the input is processed through a series of layers, each of which applies a set of filters or kernels to the input. These filters extract important features, such as edges or patterns, from the input, which are then used to classify or segment the data [14]. A convolutional neural network architecture contains several layers that work together. These layers are:

- Convolution layer: applies a set of filters or kernels to the input data, which extracts important features such as edges or patterns.
- The pooling layer is responsible for down-sampling the feature maps created by the convolutional layer to reduce their spatial dimensions. The most popular type of pooling is max pooling.
- A fully connected layer, which is also referred to as dense layer, is a type of neural network layer in which each input is connected to every output neuron by means of a learnable weight [14].

- Activation layer or activation function: applies a mathematical function to the output of a previous layer. Common activation functions include sigmoid, tanh, ReLU, and softmax. Figure 2 shows an example of a simple CNN classifier.

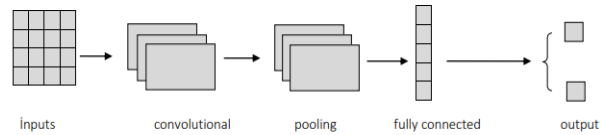


Figure 2. CNN Classifier

For the CNN classifier, we utilized two-dimensional convolutional layers and max-pooling with a dropout rate of 0.2, followed by two dense layers.

Capsule network

Capsule Network (CapsNet) is a type of neural network architecture proposed by Geoffrey Hinton and his team at the University of Toronto in 2017 [15].

The aim of Capsule networks is to overcome the limitations of traditional Convolutional Neural Networks (CNNs) such as the inability to handle variations in object position, size, and orientation.

The basic building block in a Capsule Network is a capsule, which is a group of neurons that represent a specific part of an object and encode various properties of that part, such as its pose, size, and deformation, capsule's inputs and output are vectors [15]. Capsules are organized in layers, where higher-level capsules represent more complex parts of the object [3]. Figure 3 shows Structure of the capsule network in Dynamic Routing Between Capsules, 2017.

In a capsule network, the convolutional layer performs feature extraction, and its output is fed into the primary capsule layer. Dynamic routing connects the primary capsules to higher-level capsules, allowing the network to learn how to combine and transform pose vectors for more complex and abstract input features. The DigitCaps layer is a fully connected layer with ten 16D capsules, each of which receives input from all the capsules in the previous layer. The final layer determines the length of each capsule in the previous layer, which is necessary to obtain the probability that the object or entity is present in the input [15]. To build the capsnet classifier, we utilized the code that was shared on GitHub [16].

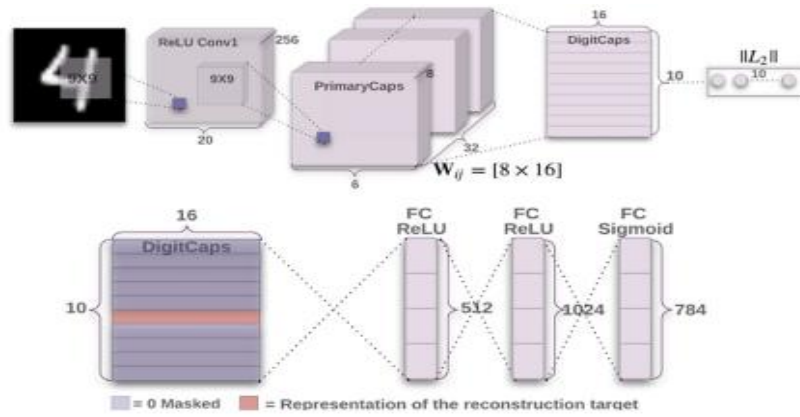


Figure 3 shows Structure of the capsule network in Dynamic Routing Between Capsules,2017.

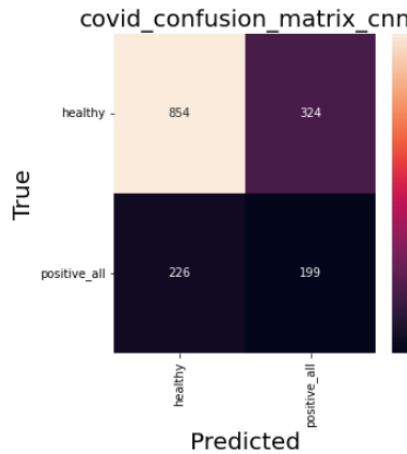
Results

After extracting features from the Coswara dataset, we used convolutional neural network and capsule network models to perform a 2-class classification of COVID-19 and health by utilizing the train-test-split cross-validation. Figure 4(a)

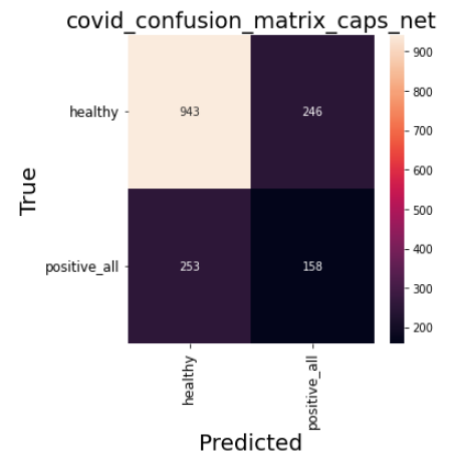
provides a visual representation of the original confusion matrix. Additionally, Figure 4(b) shows the confusion matrix for the CNN classifier, and Figure 4(c) shows the confusion matrix for the CapsNet classifier.

True label	0	True Positive	False Positive
	1	False Negative	True Negative
		0	1
		Predicted label	

(a)



(b)



(c)

Figure 4(a)shows original confusion matrix (b) confusion matrix for the CNN classifier(c) the confusion matrix for the CapsNet classifier

We used state-of-the-art evaluation metrics, such as Accuracy, Recall, Precision, and F1-Score, to assess the performance of our classification task. Table 2 displays a

detailed description and mathematical expression of these performance metrics used in our study [17].

Table 2 performance metrics		
Metrics	Description	Mathematical Expression
Accuracy	The degree of correctness of COVID-19 measurements was measured by evaluating the number of true values against all instances that were assessed.	$Acc = \frac{tp + tn}{tp + tn + fp + fn}$
Sensitivity or Recall	The proportion of true positive COVID-19 cases was calculated by dividing the number of correctly identified	$Sen = \frac{tp}{tp + fn}$

	individuals with the disease by the actual number of people who have the disease.	
Precision	The proportion of true positive COVID-19 cases was calculated by dividing the number of correctly identified individuals with the disease by the predicted number of people who were expected to have the disease.	$\text{prec} = \frac{tp}{tp + fp}$
Specificity	The proportion of true negative non-COVID-19 cases was calculated by dividing the number of correctly identified individuals without the disease by the actual number of people who do not have the disease.	$\text{Spec} = \frac{tn}{tn + fp}$
F1_Score	The weighted average of precision and recall is a performance metric that combines precision and recall using a weighted average, where the weight corresponds to the proportion of true positives for a given class.	$\text{F1_score} = 2 * \frac{\text{sen} * \text{spec}}{\text{sen} + \text{spec}}$

Table 2 presents the performance comparison of two deep learning models, CNNs and CapsNets, which were trained and evaluated using the train-test-split cross-validation method

table 3 performance of CNN and CapsNet with train-test-split cross validation					
Classifiers	Accuracy (%)	Recall (%)	Precision (%)	Specificity (%)	F1-Score (%)
CNN	69	58	59	38	58
CapsNet	69	59	59	39	59

In our study, we compared the performance of two deep learning models, Convolutional Neural Network (CNN) and Capsule Network (CapsNet), in a specific classification task. Our initial evaluation using train-test-split cross-validation showed that the two classifiers achieved comparable performance. To validate these results, we conducted k-fold cross-validation with k=10. The evaluation results revealed that the CNN classifier consistently outperformed the CapsNet classifier in terms of

Accuracy, Recall, Precision, and F1-Score. We have presented the detailed performance metrics of the CNN and CapsNet classifier using k-fold cross-validation in Table 3. In addition, we generated confusion matrices for both classifiers, with Figure 5(a) displaying the confusion matrix for the CNN classifier and Figure 5(b) showing the confusion matrix for the CapsNet classifier. Based on these findings, we can conclude that the CNN model may be a better choice for the classification task than CapsNet.

table 4 performance of CNN and CapsNet with K-Fold (where k=10) cross vldiation					
Classifiers	Accuracy (%)	Recall (%)	Precision (%)	Specificity (%)	F1-Score (%)
CNN	94	90	93	91	91
CapsNet	90	86	88	82	87

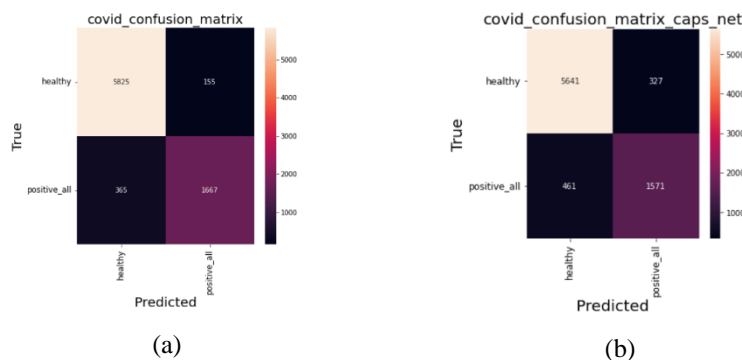


Figure 5(a) the confusion matrix for the CNN classifier 5(b) the confusion matrix for the CapsNet classifier

We observed that the training time for CNNs was 222 seconds, while Capsule Networks took 1417 seconds to train on the same dataset, indicating a significant disadvantage of Capsule Networks in terms of training time. Furthermore, using leave-one-out cross-validation with the CNN network, we achieved the highest accuracy of 99%, but it took 17,412 seconds to complete the process. As a result, we did not apply the leave-one-out cross-validation technique with CapsNet.

In addition, the effect of preprocessing techniques appears differently on two networks, where the capsule network is affected greatly as shown in Table 4.

table 5 effect of preprocessing techniques		
	CNN(ACC)	CapsNet(ACC)
With normalization, oversampling and train-test-split	0.69	0.69
With normalization, oversampling and k-fold (k=10)	0.94	0.90
Without normalization	0.86	0.26
Without oversampling	0.93	0.54

Table 6 presents the results of some previous research conducted on the Coswara dataset.

Table 6 presents the results of some previous research on the Coswara dataset			
Research	Dataset	Model/classifiers	Results ACC
Chaudhari et al. [18]	Coswara Coughvid [19]	Ensemble Deep Learning Mode	77.1%
Bagad et al. [6]	Cough Against Covid Coswara	ResNet-18 Shallow classifiers	72%
Aly at el. [8]	Coswara Virufy [19]	Deep Model Shallow classifiers	96.4%
Pahar et al. [7]	Coswara SARCOS	MLP CNN LSTM Resnet50	87% 94% 94% 95%
Alli et al. [17]	Coswara	CNN based on DeepShufNet	90.1
Verde et al. [20]	Coswara	Naive Bayes (NB) Bayes Net (BN) Support Vector Machine (SVM)	90% 89% 97%
This Study	Coswara	CapsNet (k-fold where k=10) CNN (k-fold where k=10) CNN (leave-one-out)	90% 94% 99%

Discussion and Conclusions

In this study, the Coswara dataset was selected and processed. Then, convolutional neural networks and capsule networks were applied using three types of cross-

validation techniques. The results show that CNNs achieved better results, are more flexible and easier to apply, and are less affected when preprocessing techniques such as oversampling and normalization are not applied. However, capsule networks require more training time.

References

- [1] WHO, <https://www.who.int/health-topics/coronavirus>.
- [2] D. Wang, B. Hu, C. Hu, F. Zhu, X. Liu, J. Zhang, B. Wang, H. Xiang, Z. Cheng, Y. Xiong et al, “Clinical characteristics of 138 hospitalized patients with 2019 novel coronavirus–infected pneumonia in Wuhan, China”, *JAMA*, vol. 323, no. 11, pp. 1061– 1069, 2020.
- [3] A. I. Khan , J. L.Shah , M. M. Bhat, “CoroNet: A deep neural network for detection and diagnosis of COVID-19 from chest x-ray images”,2020.
- [4] S.Walvekar,D. Shinde, “Detection of COVID-19 from CT Images Using resnet50”, 2020.
- [5] P.Aggarwal , N. K. Mishra, B.Fatimah , P. Singh , A. Gupta , S. D. Joshi ,”COVID-19 image classification using deep learning: Advances, challenges and opportunities”, 2022, 105350.
- [6] P.Bagad,A.Dalmia, J. Doshi, A. Nagrani, P. Bhamare, A.Mahale,S.Rane, N. Agarwal, R.Panicker, “Cough Against COVID: Evidence of COVID-19 Signature in Cough Sounds |”,2020.
- [7] M.Pahar, M.Klopper, R. Warren, T.Niesler, “COVID-19 Cough : Classification using Machine Learning and Global Smartphone Recordings” ,2021,104572.
- [8] M.Aly, K.H. Rahouma, S. M. Ramzy,” Pay attention to the speech: COVID-19 diagnosis using machine learning and crowdsourced respiratory and speech recordings”, pp 3487-3500, 2022.
- [9] <https://www.kaggle.com/datasets/janashreeanathan/coswara>.
- [10] <https://coswara.iisc.ac.in/?locale=en-US>.
- [11] <https://imbalanced-learn.org/stable>.
- [12] <https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.preprocessing.MinMaxScaler.html>.
- [13] <https://librosa.org/doc/main/generated/librosa.feature.mfcc.html>.
- [14]R. Yamashita & M. Nishio & R.Gian Do & K. Togashi,” Convolutional neural networks: an overview and application in radiology”, pp.611–629, 2018.
- [15]M. Patrick, A. Adekoya a , A.Mighty , B.Edward : “Capsule Networks – A survey”, pp1295-1310, 2022.
- [16]<https://github.com/XifengGuo/CapsNet-Keras>.
- [17]O. Abayomi-Alli, R.Damaševičius ,A.Abbasi ,R.Maskeliūnas ,” Detection of COVID-19 from Deep Breathing Sounds Using Sound Spectrum with Image Augmentation and Deep Learning Techniques”, 2022.
- [18] G. Chaudhari, X.Jiang, A.Fakhry, A. Han, J. Xiao, S. Shen, A. Khanzada,” Virufy: Global Applicability of Crowdsourced and Clinical Datasets for AI Detection of COVID-19 from Cough”,2020.
- [19]L. Orlandic, T. Teijeiro, D. Atienza, The COUGHVID crowdsourcing dataset: A corpus for the study of large-scale cough analysis algorithms, 2020.
- [20]L.VERDE, G.DE PIETRO, A. GHONEIM, M. ALRASHOUD , K. N. AL-MUTIB , G. SANNINO ,” Exploring the Use of Artificial Intelligence Techniques to Detect the Presence of Coronavirus Covid-19 Through Speech and Voice Analysis”, 2021.3075571.



A Novel PI-PD Controller Tuning Method Based on Neutrosophic Similarity Measure for Unstable and Integrating Processes with Time Delay

Tufan DOGRUER*

Tokat Gaziosmanpasa University, Electrical-Electronics Engineering Department, tufan.dogrue@gop.edu.tr, Orcid No: 0000-0002-0415-3042

ARTICLE INFO

Article history:

Received 26 March 2023
Received in revised form 12 April 2023
Accepted 12 April 2023
Available online 20 June 2023

Keywords:

Neutrosophic similarity measure,
PI-PD controller tuning, time delay
unstable and integrating systems

Doi: 10.24012/dumf.1271137

* Corresponding author

ABSTRACT

Integrating systems and unstable systems are two types of systems that are widely used in various industries, including control engineering and electrical engineering. However, controlling these systems can be a daunting task due to their inherent complexity. To address this challenge, the PI-PD controller structure has been widely adopted in the industry, as it has proven to be very successful in controlling integrating and unstable systems. In this paper, a new design method is proposed to determine the optimal controller parameters in the control of integrating and unstable systems with time delay. The design method utilizes a Genetic Algorithm-based optimization technique, which incorporates a new objective function that is based on the neutrosophic similarity measure. Two different types of plants have been chosen as examples in this study. The first plant is a time-delayed integrating system. The second plant is an unstable system, which means the output signal is susceptible to changes or disturbances in the input signal. This study examines the parameter uncertainties of systems by comparing them with some design methods from the literature. The results are presented comparatively in figures and tables to show the superiority of the proposed method.

Introduction

Unstable and integrating processes with time delay are common types of systems that require special attention when designing a control strategy. Unstable processes have a tendency to oscillate uncontrollably while integrating processes have a slow response to changes in the input. Time delay in a process can exacerbate these issues, as it can introduce additional instability and oscillation. Most industrial processes are characterized by time delay [1]. It is important to model these time delays accurately, as they can have significant impacts on the performance of the system over time. Transfer functions with time delay are particularly useful in modeling physical systems, as time delay is a common feature in many real-world systems [2]. Industrial processes such as heating boilers, level control, stirred tank reactors, paper drum dryer, and boiler steam drums are integrating and unstable systems. Since such systems contain poles at the origin and right half of the complex plane, these systems are very difficult to control [3, 4].

Advanced control techniques, including model-based predictive control, adaptive control, or robust control, are often required to effectively regulate unstable and integrating processes with time delay. These techniques are

designed to account for the complex dynamics of the system and provide stable and robust control in the presence of time delay. Conventional controllers, such as PID (Proportional Integral Derivative) controllers, can be used when there is dead time, but they perform poorly [5]. Also, it is known that the PID controller is insufficient to control unstable and integrating processes. Although PI-PD (Proportional Integral - Proportional Derivative) controllers are similar to PID controllers, they differ in some points. For example, while PID controllers have some structural limitations in providing the desired performance in the control of unstable, integrating and resonant systems, PI-PD controllers offer very good results for such systems [6]. While PID controllers have three parameters to be set, the PI-PD controller has four parameters in its structure. The PI-PD tuning method is a type of controller tuning method that is designed to achieve stable and robust control of integrating and unstable systems with time delay. This method combines both PI and PD control action to achieve improved performance. The PI part of the controller helps to address steady-state errors in the system by integrating the error signal over time and adjusting the control output accordingly. The PD part of the controller helps to address the dynamic response of the system by introducing a derivative term that is proportional to the rate of change of

the error signal. This derivative term helps to improve the response speed of the controller. The PD controller improves the transfer function and response of the system through the feedback loop. Thus, the poles are better positioned according to the new transfer function of the obtained system. Then, in the second loop with the PI controller, it is tried to reach the desired level of system performance. The addition of PD feedback in the inner loop can transform an open-loop unstable system into an open-loop stable one [6]. This is achieved by designing the feedback such that the output of the system converges to a desired set point. Furthermore, the proper position of stable open-loop poles is provided, meaning that the system is designed to have a stable response, even in the absence of feedback. This ensures that the system can handle external disturbances and can quickly return to a stable state after a disturbance. In this respect, the PI-PD controller structure is more advantageous than conventional PID controllers. PI-PD controllers are a control structure that provides very good results in the control of stable, unstable, integrating and resonant processes. Thus, obtaining the controller parameters for these controllers is crucial to achieve system stability. There are many precious studies on this topic in the literature [7-10]. Obtaining the most suitable parameters in the determination of controller parameters is a very serious problem and studies are still continuing on new methods.

To achieve the expected performance characteristics of a control system, it is important to tune the controller parameters. The extensive utilization of PID controllers has prompted numerous researchers to develop alternative design techniques for these controllers. The Ziegler-Nichols [11] and Åström-Hägglund [12] methods are two of the most well-known and oldest methods for determining the controller parameters of classical PID controllers. These methods have been widely used in industry and academia for many years and are still commonly used today due to their simplicity and ease of implementation. The Ziegler-Nichols method is a heuristic method that involves applying a step input to the system and adjusting the controller parameters until the system oscillates at a constant amplitude. The parameters are then determined based on the oscillation frequency and amplitude. The Åström-Hägglund method is a more systematic method that involves optimizing the controller parameters based on the system's step response characteristics. While the Ziegler-Nichols and Åström-Hägglund methods are effective for determining the controller parameters of classical PID controllers, they may not always provide optimal performance for more complex systems with non-linear dynamics and time delays. In such cases, more advanced control design methods, such as model-based and optimal control methods, may be required. In addition to PID tuning methods such as Cohen-Coon, Wang-Juang-Chan, methods based on pole placement, gain-phase margin, frequency analysis, stability analysis, and determination of optimal controller parameters are also used [13]. Optimization methods are effective methods that are based on the minimization of the error signal and are frequently used in the determination of control parameters. Performance

criteria that incorporate the integral of the error signal have been developed to compute the optimal controller parameters, taking into account the error in the closed-loop control system [14]. For example, Zhuang and Atherton [15] obtained the PID controller parameters using integral performance criteria. In their study, they presented new information about integral performance criteria and explained how they were included in the MATLAB program. Padulo and Visioli [16], who presented a set of parameter setting rules for integer and fractional order PID controllers, determined the controller parameters by minimizing with the integral of the absolute of the error (IAE) performance criterion for systems with different structures. Deniz et al. [17] determined the fractional order PID controller parameters based on ISE, ISTE, and IST²E performance criteria. Works such as [18-20] can also be given as examples of this topic. Furthermore, the optimal controller parameters can be determined by minimizing an objective function, which is defined based on the system output according to the design criteria. For example, Jun Ye [21] has proposed a method for determining PID controller parameters using GA (Genetic Algorithm) by describing an advanced level of fuzzy logic, a neutrosophic logic-based objective function. In a similar study, Fu et al. [22] used the method proposed by [21] to determine the neutrosophic self-tuning PID controller parameters for speed control of an AC permanent magnet synchronous motor.

With the understanding that the PI-PD controller provides superior control performance in many industrial processes, the number of studies involving this controller has increased rapidly. For example, Ozyetkin et al. [23] developed a straightforward and effective PI-PD tuning approach for time-delayed systems. The method is based on the determination of the stability regions of the PD and PI controller parameters by the stability boundary locus method. Then, the controller parameters are determined by the weighted geometric center method within this stable region. The researchers highlighted that their method produced reliable and robust results. Raja and Ali [4] put forward a novel method for tuning PI-PD controllers designed for unstable and integrating systems with time delay. The controller parameters were determined through the application of moment-matching technique and Routh-Hurwitz stability criteria. Another study [24] introduced a graphical technique utilizing the stability boundary locus to regulate time-delay unstable systems with a PI-PD controller. To demonstrate the effectiveness of this method, the researchers provided simulation examples and an experimental application in their study. Padhy and Majhi [25] suggested a design for a relay-based PI-PD controller that can be used for stable, unstable, and time-delayed systems. According to their findings, this approach is straightforward and enhances the performance of PI-PD controllers in comparison to various other methods. It is possible to reproduce similar works [26, 27].

The objective of this research is to develop a new PI-PD tuning method that can effectively control integrating and unstable systems with time delay while taking into account desired design criteria to improve control performance. To

achieve this objective, the researcher proposes a GA optimization approach that uses a novel objective function based on the neutrosophic similarity measure to determine the PI-PD controller parameters. The effectiveness of the proposed method is evaluated by integrating and unstable systems with time delay, and its performance is compared with other studies in the literature under different conditions such as disturbances input and parameter changes. The results indicate that the proposed method yields successful control performance, demonstrating its efficacy in controlling such systems.

The paper is divided into several sections. The second section provides an introduction to the neutrosophic similarity measure. Section 3 concentrates on tuning PI-PD controller parameters, beginning with a discussion of the PI-PD controller structure and optimization method employed in the study. Section 4 demonstrates the practical application of the proposed method by presenting two simulation examples, and comparing the results to those of previous studies in the literature. Finally, the last section outlines the research's findings.

Neutrosophic Logic and Neutrosophic Similarity Measure

Smarandache proposed the concept of neutrosophy, which is a generalized form of intuitionistic fuzzy logic, and neutrosophic sets based on this concept [28-31]. In this approach, a phenomenon is fuzzified by using membership values with three different values called True (T), Indeterminate (I) and False (F), unlike Fuzzy logic. Known set operators such as union and intersection used in fuzzy set theories are performed by considering these three membership values [31]. For example, the value T represents the degree of occurrence of an event, F is the degree of non-occurrence, and I the degree of uncertainty in the case of occurrence. Some basic definitions for neutrosophic logic are given below.

Definition 1: The universal set X is defined as the set of all elements. An arbitrary element in this set is represented by the symbol x . a neutrosophic set A in the universal set X is then characterized by three membership functions [31]:

1. The truth-membership function, denoted as $T_A(x)$, assigns a degree of membership to x in the truth subset of A .
2. The indeterminacy-membership function, denoted as $I_A(x)$, assigns a degree of membership to x in the indeterminate subset of A .
3. The falsity-membership function, denoted as $F_A(x)$, assigns a degree of membership to x in the falsity subset of A .

They presented examples of single-valued neutrosophic sets (SVNS) suitable for use in real scientific and engineering applications [32]. The following definitions are for subsets A and B , which are SVNS in the X universal set. These definitions apply to all x elements in the universal set X .

Definition 2: The complement $c(A)$ of a SVNS set A in the universal set X is defined as follows [32];

$$T_{c(A)}(x) = F_A(x),$$

$$I_{c(A)}(x) = 1 - I_A(x),$$

$$F_{c(A)}(x) = T_A(x)$$

Definition 3 (Union): The union of two SVNS, designated A and B , is again an SVNS. The process $C = A \cup B$ is defined as follows [32];

$$T_{c(A)}(x) = \max(T_A(x), T_B(x)),$$

$$I_{c(A)}(x) = \max(I_A(x), I_B(x)),$$

$$F_{c(A)}(x) = \min(F_A(x), F_B(x))$$

Definition 4 (Intersection): The intersection of the two SVNS, indicated by A and B , is again an SVNS. The $C = A \cap B$ operation is defined as follows [32];

$$T_{c(A)}(x) = \min(T_A(x), T_B(x)),$$

$$I_{c(A)}(x) = \min(I_A(x), I_B(x)),$$

$$F_{c(A)}(x) = \max(F_A(x), F_B(x))$$

Definition 5 (Containment): A being an SVNS, if and only if the other B SVNS is present under the following conditions ($A \subseteq B$) [32];

$$T_A(x) \leq T_B(x),$$

$$I_A(x) \leq I_B(x),$$

$$F_A(x) \leq F_B(x)$$

Definition 6: SVNS A and SVNS B are equal sets if and only if $A \subseteq B$ and $B \subseteq A$ ($A = B$) [32].

The similarity measure (SM) is a method used to determine the degree of similarity between two or more data sets. It is a mathematical technique that helps to compare the similarity or dissimilarities between data points. SM can be used to compare various types of data sets, such as numerical, categorical, or even text data. The function of SM is to quantify the similarity between the data, which helps in better decision-making and problem-solving. Sets defined according to certain criteria can be used as data sets. In this way, the degree of similarity between two or more sets can be determined by this method. This approach is a widely used method in decision-making problems [33]. Further, this method is widely used in various fields, including machine learning, data mining, and image processing. By using the SM, we can quantify the similarity between datasets and use this information to make informed decisions. A similarity measure between sets defined in neutrosophic space is proposed in [34].

In control applications, it is one of the main goals for a system to reach the control reference in the shortest possible time and with the least oscillation and to stay at this reference value. Further, the minimum overshoot value should be obtained. The process of tuning the PID controller parameters is geared towards meeting as many of these specifications as possible. The process of determining the optimal values of the PID parameters is actually a decision-

making problem [33]. In recent years, studies have been carried out in the literature to determine PID controller parameters using the neutrosophic similarity measure [21, 22, 33]. In these studies, researchers first determine an ideal neutrosophic set consisting of as many elements as the number of unit-step characters for the requested unit-step response (rise time, maximum overshoot, settling time, peak time, etc.) of the controlled system. While determining the ideal set, as a general approach, it can be chosen to take the T value close to 1 and the F and I values close to 0. Then, each of the unit step characteristics taken from the system is passed through T , I , and F membership functions, taking into account the system response expectations and general control criteria, so that each unit step criterion is converted to a neutrosophic value in the form of $x(T, I, F)$. As a result, the PID controller parameters are determined according to the difference between the ideal set and the real set using the neutrosophic similarity measure.

Theorem 1: Let the similarity measure between sets A and B be denoted as $SM(A,B)$ [35];

- (i) $SM(A,B) = SM(A,B)$,
- (ii) $0 \leq SM(A,B) \leq 1$,
- (iii) $SM(A,B) = 1$, if and only if $A = B$.

Definition 7: S_J, S_D, S_C are vector similarity measures of Jaccard, Dice, and Cosine, respectively. These are defined as follows [21];

$$S_J(A, B) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\left(\begin{matrix} T_A(x_i)T_B(x_i) + I_A(x_i)I_B(x_i) \\ + F_A(x_i)F_B(x_i) \end{matrix} \right)}{\left(\begin{matrix} (T_A^2(x_i) + I_A^2(x_i) + F_A^2(x_i)) + \\ (T_B^2(x_i) + I_B^2(x_i) + F_B^2(x_i)) \\ - \left(\begin{matrix} T_A(x_i)T_B(x_i) + I_A(x_i)I_B(x_i) \\ + F_A(x_i)F_B(x_i) \end{matrix} \right) \end{matrix} \right)} \quad (1)$$

$$S_D(A, B) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{2 \left(\begin{matrix} T_A(x_i)T_B(x_i) + I_A(x_i)I_B(x_i) \\ + F_A(x_i)F_B(x_i) \end{matrix} \right)}{\left(\begin{matrix} (T_A^2(x_i) + I_A^2(x_i) + F_A^2(x_i)) \\ + (T_B^2(x_i) + I_B^2(x_i) + F_B^2(x_i)) \end{matrix} \right)} \quad (2)$$

$$S_C(A, B) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\left(\begin{matrix} T_A(x_i)T_B(x_i) + I_A(x_i)I_B(x_i) \\ + F_A(x_i)F_B(x_i) \end{matrix} \right)}{\sqrt{(T_A^2(x_i) + I_A^2(x_i) + F_A^2(x_i))} \times \sqrt{(T_B^2(x_i) + I_B^2(x_i) + F_B^2(x_i))}} \quad (3)$$

Theorem 2: The $S_k(A, B)$ similarity measure (where $k = J, D, C$) based on the Jaccard, Dice, and Cosine similarity measures [21] implements the following properties:

- (i) $0 \leq S_k(A, B) \leq 1$,
- (ii) $S_k(A, B) = S_k(A, B)$,

(iii) $S_k(A, B) = 1$ if $A = B$, i.e., $T_A(x_i) = T_B(x_i)$,

$I_A(x_i) = I_B(x_i)$ ve $F_A(x_i) = F_B(x_i)$ all $x_i \in X$.

In the study, Jaccard similarity measure is used in line with the findings of Can and Özgüven [33] in their studies.

PI-PD Controller Design

Atherton and Majhi [14] propose a modified version of the PID controller (Figure 1) where an internal PD feedback is introduced to relocate the poles of the transfer function to more desirable positions. The modified controller uses a PI controller in the forward loop to improve system performance.

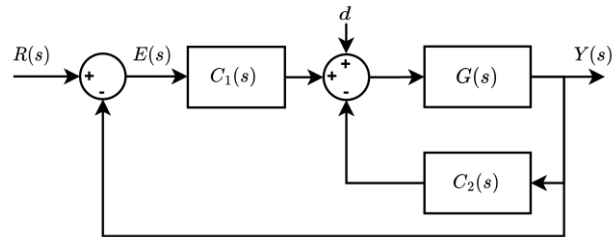


Figure 1. PI-PD feedback control structure.

The PI-PD controller has four parameters to be calculated. The equations of this controller structure are given as follows for the PI and PD controllers, respectively.

$$C_1(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (4)$$

$$C_2(s) = K_f + K_d s \quad (5)$$

In the equations, K_p and K_f are the proportional gain, K_i and K_d are the coefficients of the integral and derivative terms, respectively.

In this study, an optimization technique is applied to obtain PI-PD controller parameters. In the optimization technique, the Jaccard neutrosophic similarity measure given in Equation 1 is proposed as the objective function. Thus, it is aimed to contribute to control engineering applications by making an improvement in the PI-PD design methodology. The block diagram of the model used in the design process is given below.

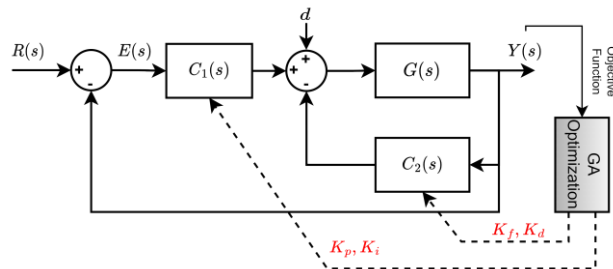


Figure 2. Block diagram of proposed optimization scheme.

In the study, PI-PD controller designs are carried out for two different plant structures, integrating and unstable plants. In the time response of the controlled system, target values of settling, rise, and peak time as well as overshoot and steady-state error are determined. Objective functions using the neutrosophic similarity measure created according to these values are defined. The objective function used in the optimization is given in Equation 6.

$$J_{\min} = 1 - S_J(A, B) \tag{6}$$

In Equation 6, $S_J(A, B)$ is the similarity ratio of A and B single-valued neutrosophic sets. In the equation, set A is the ideal set created for the control performance criteria, and B is the real neutrosophic set created according to the performance criteria taken from the system output. Table 1 shows the ideal neutrosophic set A . The representations of a_i given in the table are the neutrosophic elements of the ideal set A . For example, the representation of a_1 is a 3-valued neutrosophic element obtained by passing the rise time of the system through the neutrosophic membership functions. The neutrosophic representation of this element is $a_i (T_i, I_i, F_i)$.

Table 1. A ideal neutrosophic set.

A	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
	Rise time	Settling time	Peak time	O.S (%)	Steady-state error
i	[1,0,0]	[1,0,0]	[1,0,0]	[1,0,0]	[1,0,0]

Each a_i element in the table is obtained with the neutrosophic membership functions shown in Figure 3. These membership functions are determined based on general control criteria and experience. By following the same method, real set B is created.

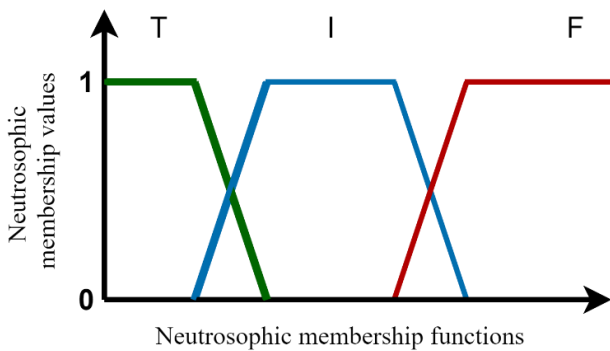


Figure 3. Membership functions used for the unit step response characteristics.

The MATLAB program contains commands and functions in the Optimization toolbox that can be used for minimization or maximization. Genetic algorithm is one of these optimization algorithms. Genetic algorithms, the first general form of which is stated by Goldberg (1989), give more successful results than traditional optimization methods. By scanning a certain part of the solution space, they reach the solution in a short time [36]. Genetic algorithms offer several advantages, such as the ability to optimize complex and non-linear functions, handle constraints on the solution space, search for multiple

solutions simultaneously, and avoid getting stuck in local optima, which makes them applicable to a wide range of problems. In the study, GA is used to determine the PI-PD controller parameters. The population size of the GA is chosen to be 50, the number of iterations 100, and the optimization is repeated 10 times for each sample. Then, the PI-PD controller parameters corresponding to the smallest objective function value are determined as the optimal controller parameters.

The proposed method can be summarized as follows.

Step 1. The control scheme is created.

Step 2. Desired time response specifications are determined for the sample plant.

Step 3. The objective function is defined according to the Jaccard neutrosophic similarity measure.

Step 4. Variables such as controller parameter lower and upper bounds, population number, and iteration number are defined in optimization algorithms.

Step 5. The optimization algorithm is initiated and when the specified number of iterations is reached, the optimization algorithm stops.

Step 6. The best controller parameters are determined.

Simulation Studies

For the purpose of illustrating the viability of the suggested approach, two PI-PD controller designs are made in this section. One of the example given is time-delay integrating processes, while the other one is time-delayed unstable systems. In the examples, the time response specifications of the systems with controllers are compared with various methods in the literature and the results are shown with figures. In addition, the analyses of the systems are made according to the parameter uncertainties, and the results are given in the text.

Example 1: Consider

$$G_1(s) = \frac{e^{-0.2s}}{s(0.1s+1)(s+1.2)} \tag{7}$$

which is an integrating transfer function with time delay. The controller design process begins with the determination of the neutrosophic ideal set according to the definition of the transient and steady-state specifications for the processes. In all examples, A neutrosophic ideal set is taken as in Table 1. The reference maximum values of the transient and steady-state specifications for this example are rise time 1.5s, settling time 4s, peak time 4s, maximum overshoot 5%, and steady-state error 0.005. The optimization process is started by applying the method described in Section 3 to the integrating process. When the specified number of iterations is reached, the optimization stops and the controller parameters are determined. Table 2 lists the obtained PI-PD controller parameters. Also, the

table includes the controller parameters that were derived using various techniques from the literature.

Table 2. Controller parameters for all Examples.

Tuning method	Controller parameters			
	K_p	K_i	K_f	K_d
Example 1				
Proposed PI-PD	2.3096	2.9454	2.9564	2.5511
Kaya I-PD – ISTE [37]	-	8.7408	9.073	4.3823
Kaya I-PD – IST ² E [37]	-	6.3714	7.7540	3.6831
Chakraborty I-PD [26]	-	0.8676	2.6680	1.1152
Ali and Majhi PID [18]	3.7550	1.6312	-	2.6323
Example 2				
Proposed PI-PD	0.1581	0.0363	0.3974	0.4391
Kaya PI-PD [9]	0.0680	0.0340	0.4630	0.3230
Padhy and Majhi PI-PD [25]	0.0848	0.0451	0.4998	0.5000
Tan PI-PD [6]	0.0700	0.0300	0.4130	0.2000
Onat PI-PD [24]	0.1070	0.0393	0.4390	0.3412
Raja and Ali PI-PD [4]	0.1650	0.0314	0.3800	0.3800

The time response characteristics are shown in Table 3 and the unit step responses are illustrated in Figure 4, after applying the controller parameters given in Table 2 to the integrating process. When Figure 4 is examined, it is seen that the proposed method is quite superior to other methods, especially in terms of settling time. When the rise and peak times are compared, it is clear that satisfactory results are obtained with the proposed method. It is also obvious that the maximum overshoot value is lower than the results obtained with other methods. In order to compare the controller performances, a disturbance input with an amplitude of -0.5 is applied to the systems at $t=15s$, and the results are presented in Figure 4. It is observed that the proposed method eliminates the disturbance in a very short time without oscillation.

Since parameter uncertainty often exists in real systems, it will be useful to examine the performance of the designed controller under parameter uncertainty. Let's assume that

there is uncertainty in the four parameters of the transfer function given in Equation 7, and let's assume this system as in Equation 8.

$$G_1(s) = \frac{e^{-[0.16,0.24]s}}{[0.08,0.12]s^3 + [1.02,1.22]s^2 + [1.1,1.3]s} \quad (8)$$

By choosing four points for each parameter of the transfer function in Equation 8, 256 transfer functions are obtained. When PI-PD controller parameters are applied to these transfer functions as $K_p=2.3096$, $K_i=2.9454$, $K_f=2.9564$ and $K_d=2.5511$ the unit step responses of the obtained closed-loop system are obtained as in Figure 4. It can be seen from Figure 4 that the designed controller provides a robust control for the system with parameter uncertainty.

Table 3. Time response specifications for all Examples.

Tuning method	Time specifications			
	Rise time	Settling time	Peak time	O.S (%)
Example 1				
Proposed PI-PD	0.8931	1.6664	3.7639	1.5234
Kaya I-PD – ISTE [37]	0.7950	5.4670	3.0035	11.8100
Kaya I-PD – IST ² E [37]	1.0125	3.8730	3.3164	5.9000
Chakraborty I-PD [26]	4.5106	9.0995	30	0
Ali and Majhi PID [18]	0.6782	6.4836	2.7598	28.8590
Example 2				
Proposed PI-PD	3.1591	10.7062	14.3003	1.5074
Kaya PI-PD [9]	6.5245	18.5726	56.9760	0
Padhy and Majhi PI-PD [25]	7.4118	12.9006	20.4859	0.4426
Tan PI-PD [6]	4.6563	20.6927	10.7069	6.2233
Onat PI-PD [24]	3.8028	15.7837	8.6488	1.8784
Raja and Ali PI-PD [4]	3.0613	13.6315	7.5235	4.9563

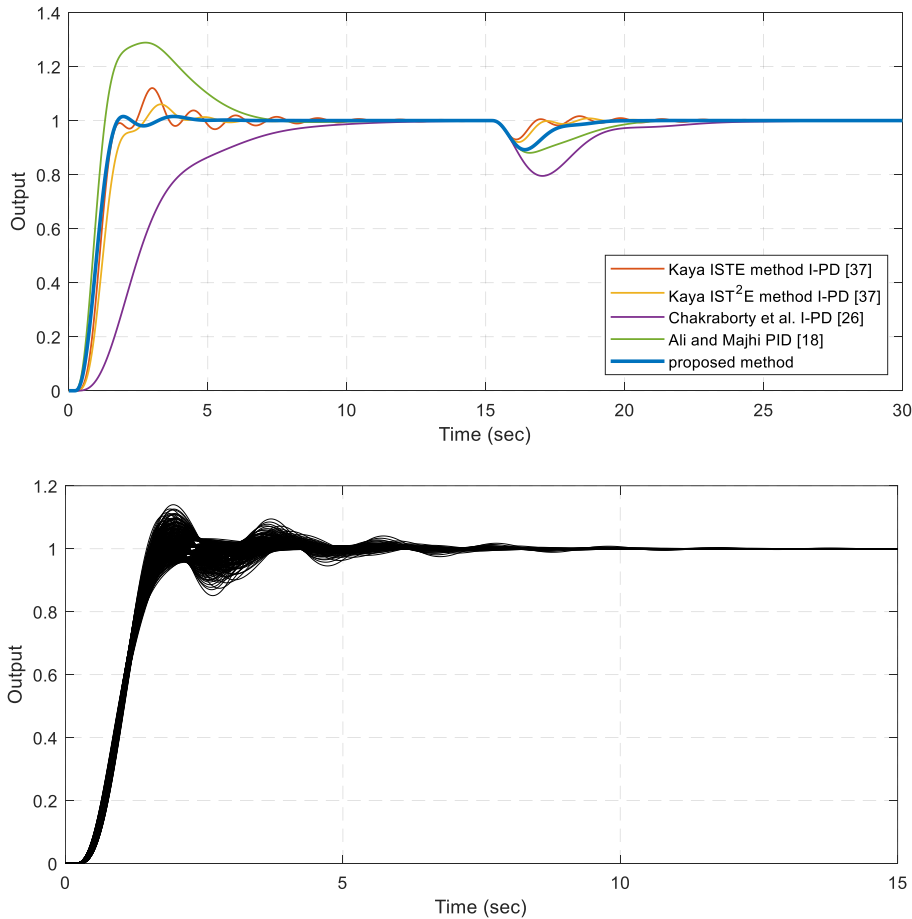


Figure 4. System output responses for Example 1 (*top*: Set-point and disturbance step responses, *bottom*: Step responses for 256 transfer functions for parameter uncertainty).

Example 2: Consider the transfer function of an unstable first order plus dead time system.

$$G_2(s) = \frac{4e^{-2s}}{(4s-1)} \quad (9)$$

The classification of a system as unstable is based on the presence of one or more poles in the right half-plane of its transfer function. An unstable system is represented by the chosen sample. The aim is to determine the controller parameters that stabilize the system and meet the design requirements set out at the outset. The rise, settling, and peak times of less than 4s, 11s, and 8s, respectively, are sufficient for good control. Desired design criteria are that the maximum overshoot should be less than 4%, and the steady-state error should be less than 0.005. The optimization process begins with the definition of the objective function and the application of the proposed method to the unstable system. When the optimization stops, the optimal PI-PD controller parameters are determined in Table 2.

The unit step responses obtained by applying the proposed method and the PI-PD controller parameters found in five different methods in the literature to the system are given in Figure 5, and the time response characteristics of these responses are given in Table 3. In addition, the performances of the systems are compared by applying -0.1 amplitude disturbance input at t=60s. It is noteworthy that the controller designed with the proposed method provides a faster settling time for the system compared to the controllers designed with other methods. It can be seen from Figure 5 that the proposed method also performs successful control in criteria such as maximum overshoot, rise time, and disturbance rejection.

In this example, as in other examples, the robustness of the system is tested, and the results are presented in Figure 5. In Equation 10, uncertainty limits are determined for four parameters, and a total of 256 transfer functions are created by choosing four values for each parameter.

$$G_2(s) = \frac{[3.8, 4.2]e^{-[1.9, 2.1]s}}{[3.8, 4.2]s - [0.9, 1.1]} \quad (10)$$

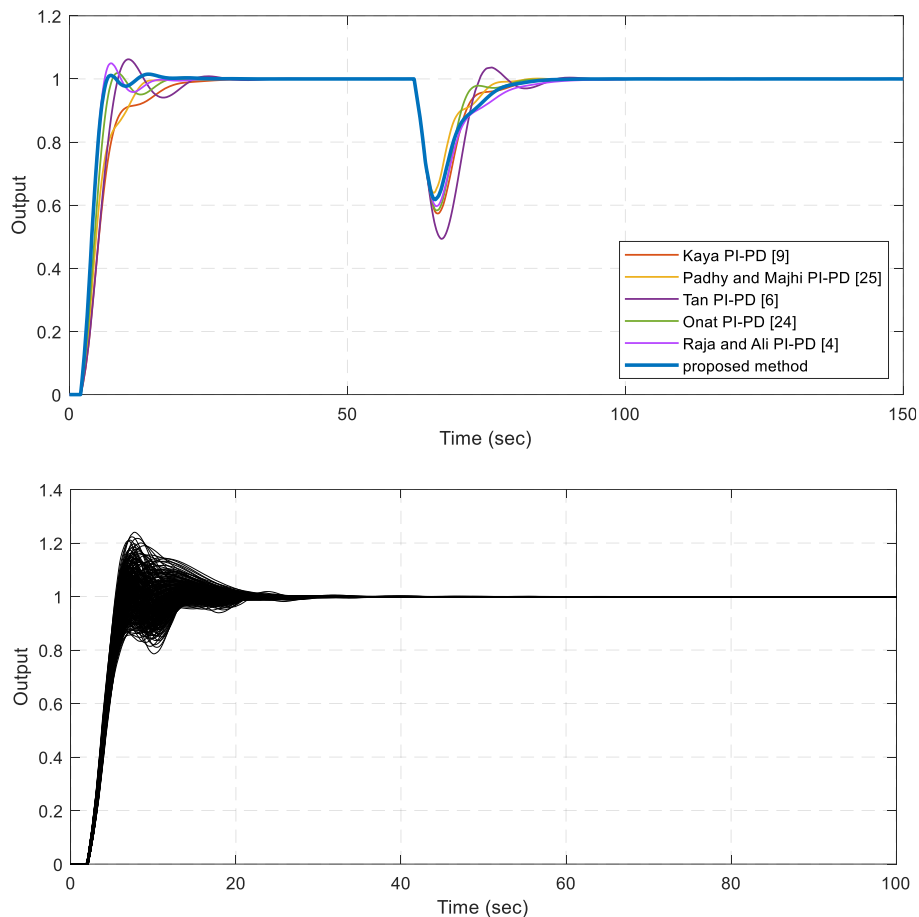


Figure 5. System output responses for Example 2 (*top*: Set point and disturbance step responses, *bottom*: Step responses for 256 transfer functions for parameter uncertainty).

Conclusions

In this paper, an optimization method is proposed for tuning PI-PD controller parameters. The originality of the proposed method is revealed through the objective function created using the neutrosophic similarity measure. To test the performance of the proposed method, integrating and unstable plants with dead time from literature are selected. The results are presented in figures and tables in comparison with studies in the literature. Furthermore, simulations are carried out assuming that there is parameter uncertainty in the systems. The proposed method successfully controls integrating and unstable systems with time delays, including parameter uncertainty. The proposed method exhibits superiority over other methods, particularly in terms of settling time and maximum overshoot. As a result, the PI-PD controller parameters can be practically and effectively determined.

Ethics committee approval

Ethics committee approval is not required for this study.

Conflict of interest statement

There is no conflict of interest for this study.

References

- [1] J. E. Normey-Rico, *Control of dead-time processes*. Springer Science & Business Media, 2007.
- [2] L. M. Eriksson and M. Johansson, "PID controller tuning rules for varying time-delay systems," in *2007 American Control Conference*, 2007, pp. 619-625: IEEE.
- [3] S. E. Hamamci and M. Koksakal, "Calculation of all stabilizing fractional-order PD controllers for integrating time delay systems," *Computers & Mathematics with Applications*, vol. 59, no. 5, pp. 1621-1629, 2010.
- [4] G. L. Raja and A. Ali, "New PI-PD Controller Design Strategy for Industrial Unstable and Integrating Processes with Dead Time and Inverse Response," *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, vol. 32, no. 2, pp. 266-280, 2021.
- [5] P. García and P. Albertos, "Robust tuning of a generalized predictor-based controller for integrating and unstable systems with long time-delay," *Journal of Process Control*, vol. 23, no. 8, pp. 1205-1216, 2013.
- [6] N. Tan, "Computation of stabilizing PI-PD controllers," *International Journal of Control, Automation and Systems*, vol. 7, no. 2, pp. 175-184, 2009.

- [7] P. Dash, L. C. Saikia, and N. Sinha, "Flower pollination algorithm optimized PI-PD cascade controller in automatic generation control of a multi-area power system," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 82, pp. 19-28, 2016.
- [8] E. Dincel and M. T. Söylemez, "Digital PI-PD controller design for arbitrary order systems: Dominant pole placement approach," *ISA transactions*, vol. 79, pp. 189-201, 2018.
- [9] I. Kaya, "A PI-PD controller design for control of unstable and integrating processes," *ISA transactions*, vol. 42, no. 1, pp. 111-121, 2003.
- [10] H. Li, "Tuning of PI-PD controller using extended non-minimal state space model predictive control for the stabilized gasoline vapor pressure in a stabilized tower," *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, vol. 142, pp. 1-8, 2015.
- [11] K. Ogata and Y. Yang, *Modern control engineering*. Prentice hall India, 2002.
- [12] K. J. Åström and T. Hägglund, *PID controllers: theory, design, and tuning*. Instrument society of America Research Triangle Park, NC, 1995.
- [13] H. Wu, W. Su, and Z. Liu, "PID controllers: Design and tuning methods," in *2014 9th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, 2014, pp. 808-813: IEEE.
- [14] D. P. Atherton and S. Majhi, "Limitations of PID controllers," in *Proceedings of the 1999 American Control Conference (Cat. No. 99CH36251)*, 1999, vol. 6, pp. 3843-3847: IEEE.
- [15] M. Zhuang and D. Atherton, "Tuning PID controllers with integral performance criteria," in *International Conference on Control 1991. Control'91*, 1991, pp. 481-486: IET.
- [16] F. Padula and A. Visioli, "Tuning rules for optimal PID and fractional-order PID controllers," *Journal of process control*, vol. 21, no. 1, pp. 69-81, 2011.
- [17] F. N. Deniz, A. Yüce, and N. Tan, "Tuning of PI-PD controller based on standard forms for fractional order systems," *Journal of Applied Nonlinear Dynamics*, vol. 8, no. 1, pp. 5-21, 2019.
- [18] A. Ali and S. Majhi, "Integral criteria for optimal tuning of PI/PID controllers for integrating processes," *Asian Journal of Control*, vol. 13, no. 2, pp. 328-337, 2011.
- [19] S. M. H. Mousakazemi, "Comparison of the error-integral performance indexes in a GA-tuned PID controlling system of a PWR-type nuclear reactor point-kinetics model," *Progress in Nuclear Energy*, vol. 132, p. 103604, 2021.
- [20] M. S. Tavazoei, "Notes on integral performance indices in fractional-order control systems," *Journal of Process Control*, vol. 20, no. 3, pp. 285-291, 2010.
- [21] J. Ye, "PID tuning method using single-valued neutrosophic cosine measure and genetic algorithm," *Intelligent Automation and Soft Computing*, vol. 25, no. 1, pp. 15-23, 2019.
- [22] Z. Fu, C. Liu, S. Ruan, and K. Chen, "Design of Neutrosophic Self-Tuning PID Controller for AC Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Neutrosophic Theory," *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2021, p. 5548184, 2021/05/12 2021.
- [23] M. M. Ozyetkin, C. Onat, and N. Tan, "PI-PD controller design for time delay systems via the weighted geometrical center method," *Asian Journal of Control*, vol. 22, no. 5, pp. 1811-1826, 2020.
- [24] C. Onat, "A new design method for PI-PD control of unstable processes with dead time," *ISA transactions*, vol. 84, pp. 69-81, 2019.
- [25] P. K. Padhy and S. Majhi, "Relay based PI-PD design for stable and unstable FOPDT processes," *Computers & chemical engineering*, vol. 30, no. 5, pp. 790-796, 2006.
- [26] S. Chakraborty, S. Ghosh, and A. K. Naskar, "I-PD controller for integrating plus time-delay processes," *IET Control Theory & Applications*, vol. 11, no. 17, pp. 3137-3145, 2017.
- [27] I. Kaya, "Optimal PI-PD Controller Design for Pure Integrating Processes with Time Delay," *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, vol. 32, no. 3, pp. 563-572, 2021.
- [28] F. Smarandache, "Neutrosophy," *arXiv preprint math/0010099*, 2000.
- [29] F. Smarandache, *Neutrosophy, a new Branch of Philosophy*. Infinite Study, 2002.
- [30] F. Smarandache, "Definiton of neutrosophic logic-a generalization of the intuitionistic fuzzy logic," in *EUSFLAT Conf.*, 2003, pp. 141-146: Citeseer.
- [31] F. Smarandache, "Neutrosophic set-a generalization of the intuitionistic fuzzy set," *International journal of pure and applied mathematics*, vol. 24, no. 3, p. 287, 2005.
- [32] H. Wang, F. Smarandache, Y. Zhang, and R. Sunderraman, *Single valued neutrosophic sets*. Infinite study, 2010.
- [33] M. S. Can and O. F. Ozguven, "PID tuning with neutrosophic similarity measure," *International Journal of Fuzzy Systems*, vol. 19, no. 2, 2017.
- [34] S. Broumi and F. Smarandache, *Several similarity measures of neutrosophic sets*. Infinite Study, 2013.
- [35] A. Mukherjee and S. Sarkar, "Several similarity measures of neutrosophic soft sets and its application in real life problems," *Annals of Pure and Applied Mathematics*, vol. 7, no. 1, pp. 1-6, 2014.
- [36] D. E. Goldberg and K. Deb, "A comparative analysis of selection schemes used in genetic algorithms," in *Foundations of genetic algorithms*, vol. 1: Elsevier, 1991, pp. 69-93.
- [37] I. Kaya, "I-PD controller design for integrating time delay processes based on optimum analytical formulas," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 51, no. 4, pp. 575-580, 2018.



Araştırma Makalesi / Research Article

Gauss karışım gürültüsü varlığında tek eşikli sezici ile maksimum olabilirlik sezici arasında performans karşılaştırması

*Performance comparison between single threshold detectors and maximum likelihood detectors in the presence of Gaussian mixture noise*M. Emin Tutay^{1*}¹Dicle Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Diyarbakır, emin.tutay@dicle.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1506-0028>

MAKALE BİLGİLERİ

*Makale geçmişi:*Geliş: 5 Mayıs 2023
Revizyon: 22 Mayıs 2023
Kabul: 14 Haziran 2023
Online: 20 Haziran 2023*Anahtar kelimeler:*

ML kurallı sezici, tek eşikli sezici

ÖZET

Bu çalışmada, ikili haberleşme sistemleri simetrik Gauss karışım gürültülü kanal için çalışılmaktadır. Tek eşikli sezici ile optimal olan ML kurallı sezici hata olasılıkları açısından karşılaştırılmaktadır. İlk olarak, tek eşikli sezicinin optimal olduğu yeter koşul sunulmaktadır. Bu koşulun sağlanmadığı durumda, tek eşikli sezicinin gürültüsüz koşullarda dahi oldukça düşük performansa sahip olabildiği belirtilmektedir. Daha sonra, aynı koşullar için ML kurallı sezici incelenmekte ve asimptotik sonuçlar elde edilmektedir. Son olarak, çeşitli senaryolar için benzetim sonuçları elde edilmekte ve teorik bulguları doğrulamak için sonuçlar ayrıntılı olarak tartışılmaktadır.

ARTICLE INFO

*Article history:*Received: 5 May 2023
Revised: 22 May 2023
Accepted: 14 June 2023
Available Online: 20 June 2023*Keywords:*

ML detector, single threshold detector

ABSTRACT

In this paper, binary communication systems are studied in the presence of symmetric Gaussian mixture noise channels. The performance of single threshold detectors is compared with that of the optimal maximum likelihood (ML) detector in terms of error probability. First, sufficient conditions for the single threshold detector to be optimal are presented. It is discussed that if the conditions are not satisfied, then single threshold detectors could exhibit significantly inferior performance even in noiseless conditions. In addition, the ML detector is examined for the identical conditions, and asymptotic results are derived. Finally, simulation results are obtained for various scenarios, and the results are discussed in detail to verify the theoretical findings.

Doi: 10.24012/dumf.1293154

* Sorumlu yazar

Giriş

Ortalama güç kısıtı altında, kanal gürültüsünün unimodal (tek tepeli) dağılıma sahip olduğu ikili haberleşme sistemi düşünüldüğünde, ortalama hata olasılığını minimize eden optimal alıcı, tek eşikli sezici olarak elde edilmektedir. Önsel olasılıkların birbirine eşit olması durumunda, tek eşikli sezici için optimal eşik değeri '0' olmaktadır. Literatürde, işaret sezici olarak adlandırılan bu sezici, ölçümün sadece işaret değerine bakarak karar vermektedir [1]-[3].

İşaret sezici, basit yapısından dolayı yaygın olarak kullanılmakla birlikte, kanal gürültüsü frekans bozucu veya diğer kullanıcılardan dolayı unimodal dağılıma sahip olmayabilir [4]-[6]. Örneğin, kanal karışması durumunda gürültü simetrik Gauss karışım modeli olarak modellenmektedir [4].

Gürültünün unimodal dağılıma sahip olmadığı genel durum düşünüldüğünde, optimal alıcı yapısı maksimum sonsal olasılık (MAP) kurallı sezici şeklinde olmaktadır [1]. Bu sezici kuralı için olabilirlik oran fonksiyonu elde edilmekte ve bu değer eşik değeri ile karşılaştırılmaktadır. Önsel olasılıkların birbirine eşit olması durumunda, bu sezici maksimum olabilirlik (ML) kurallı sezici olarak adlandırılmaktadır.

Tek eşikli sezici ile ilgili çalışmalar literatürde sunulmuştur [8]-[11]. İşaret sezici ve tek eşikli sezici ortalama hata olasılığı açısından daha önce karşılaştırılmıştır [11]. Aynı çalışmada işaret sezicinin tek eşikli seziciler arasında optimal olduğu ve olmadığı koşullar sunulmuştur. Ayrıca, tek eşikli sezici ve işaret sezicinin ortalama hata olasılıkları arasındaki oran için bir üst sınır elde edilmiştir.

Tek eşikli sezici ve işaret sezici basit yapısından dolayı avantajlı görülmekle birlikte, gürültünün unimodal dağılıma sahip olmadığı durumlarda oldukça kötü performanslar gösterebilmektedir [11]-[13]. Literatürde, gürültünün simetrik Gauss karışımı olarak modellendiği çalışmalar mevcuttur [14]-[15]. Bu çalışmada, kanal gürültüsü simetrik Gauss karışım modeli olarak modellenmekte ve optimal olan ML kurallı sezici ile tek eşikli sezici karşılaştırılmaktadır. İlk olarak, işaret sezicinin optimal olduğu koşul sunulmaktadır. Daha sonra, kanal gürültü varyans değerinin çok düşük olduğu durumlar için her iki sezici arasında karşılaştırma yapılmaktadır.

Problem Tanımı

İkili haberleşme sistemi düşünüldüğünde alıcıda elde edilen sayıl ölçüm, aşağıdaki eşitlik ile verilmektedir.

$$y = \begin{cases} -\sqrt{A} + n, & H_0 \\ \sqrt{A} + n, & H_1 \end{cases} \quad (1)$$

Burada, A sinyal gücünü gösterirken, n gürültüyü temsil etmektedir. H_0 ve H_1 sırasıyla '0' ve '1' bitlerinin iletimlerine karşılık gelen hipotezleri göstermektedir.

Sistem gürültüsü, Gauss karışım modeli olarak modellenmekte ve olasılık yoğunluk fonksiyonu (OYF),

$$f_N(n) = \sum_{i=1}^L \lambda_i \left[f(n; m_i, \sigma_i^2) + f(n; -m_i, \sigma_i^2) \right] \quad (2)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada, $m_1 < m_2 < \dots < m_L$ ilişkisi geçerli olup,

$$f(n; m_i, \sigma_i^2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_i} e^{-\frac{(n-m_i)^2}{2\sigma_i^2}} \quad (3)$$

OYF'si ortalama değeri m_i ve varyansı σ_i^2 olan Gauss dağılımına karşılık gelmektedir. İletilen bilgi sembolünü tahmin etmek için, aşağıda verilen

$$\begin{aligned} H_0 : Y &\square f_N(y + \sqrt{A}) \\ H_1 : Y &\square f_N(y - \sqrt{A}) \end{aligned} \quad (4)$$

ikili hipotez testini gerçekleştirmek gerekmektedir. Haberleşme sisteminin alıcı kısmında, tek eşikli sezici olarak adlandırılan ve bit tahminini aşağıda verilen kurala göre yapan sezici çeşidi kullanılabilir [1],[11].

$$\delta(y) = \begin{cases} 1, & y > \tau \\ 0, & y < \tau \end{cases} \quad (5)$$

Bu sezici kuralı, gürültülü ölçümü (y) önceden belirlenen bir eşik seviyesi (τ) ile karşılaştırmakta ve yukarıda belirtilen şekilde karar vermektedir. Eşitlik durumunda ise, '0' veya '1' bitlerinden biri seçilmektedir. Bu sezici, eşik seviyesinin 0 olduğu ($\tau = 0$) özel durumda işaret sezici olarak adlandırılmaktadır. Tek eşikli sezici için ortalama hata olasılığını minimize eden optimal eşik seviyesi belirlenmekte ve bu değer kullanılmaktadır. Bu durumda elde edilen ortalama hata olasılığı, aşağıdaki gibi elde edilebilir [11].

$$\begin{aligned} P_e^* &= \pi_0 \sum_{i=1}^L \lambda_i \left[Q\left(\frac{\sqrt{A} + \tau^* - m_i}{\sigma_i}\right) + Q\left(\frac{\sqrt{A} + \tau^* + m_i}{\sigma_i}\right) \right] \\ &+ \pi_1 \sum_{i=1}^L \lambda_i \left[Q\left(\frac{\sqrt{A} - \tau^* - m_i}{\sigma_i}\right) + Q\left(\frac{\sqrt{A} - \tau^* + m_i}{\sigma_i}\right) \right] \end{aligned} \quad (6)$$

Burada, τ^* optimal eşik seviyesini göstermekte ve $Q(\cdot)$

fonksiyonu, $Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty e^{-t^2/2} dt$ eşitliği ile verilmektedir [3]. Tek eşikli sezici basit yapısından dolayı tercih edilip yaygın olarak kullanılmakla birlikte optimal değildir [7]. Optimal sezici olarak maksimum sonsal olasılıklı (MAP) sezici kullanılmaktadır. MAP kurallı sezici aşağıda verilen kurala göre sezim işlemini gerçekleştirmektedir [1].

$$\delta(y) = \begin{cases} 1, & L(y) > \frac{\pi_0}{\pi_1} \\ 0, & L(y) < \frac{\pi_0}{\pi_1} \end{cases} \quad (7)$$

Eşitlik durumunda, iki hipotezden herhangi biri seçilebilir. Burada, π_0 ve π_1 sırasıyla '0' ve '1' bitleri için önsel olasılıkları göstermektedir. $L(y)$ olabilirlik oran fonksiyonu olarak adlandırılmakta ve aşağıdaki eşitlik ile verilmektedir.

$$L(y) = \frac{p_1(y)}{p_0(y)} \quad (8)$$

MAP kurallı sezici için ortalama hata olasılığı, aşağıda verilmektedir [1]-[2].

$$P_e^\dagger = \int \min[\pi_0 p_0(y), \pi_1 p_1(y)] dy \quad (9)$$

Önsel olasılıkların eşit olduğu ($\pi_0 = \pi_1 = 0.5$) özel durumda MAP kurallı sezici maksimum olabilirlik (ML) kurallı sezici olarak adlandırılmaktadır. Bu çalışmada, önsel olasılıkların eşit olduğu kabul edilmekte ve ML kurallı sezici çalışılmaktadır.

Tek Eşikli Sezici ve Optimal Sezici

Çalışmanın bu kısmında ilk olarak tek eşikli sezicinin optimal olması için yeter koşul sunulmaktadır. Aşağıdaki önermede sunulan bu koşul işaret sezici ile tek eşikli sezici karşılaştırmasının yapıldığı bir başka çalışmada daha önce sunulmuştur [11].

Önerme 1: Aşağıdaki eşitsizliğin sağlanması durumunda, denklem (4)'te verilen problem için optimal sezici, işaret sezici şeklinde elde edilmektedir.

$$m_L \leq \sqrt{A} \quad (10)$$

İspat: İlk olarak, denklem (4)'te verilen ikili hipotez için koşullu OYF'ler,

$$p_1(y) = \sum_{i=1}^L \frac{\lambda_i}{\sqrt{2\pi}\sigma_i} \left[e^{-\frac{(y-\sqrt{A}-m_i)^2}{2\sigma_i^2}} + e^{-\frac{(y-\sqrt{A}+m_i)^2}{2\sigma_i^2}} \right] \quad (11)$$

$$p_0(y) = \sum_{i=1}^L \frac{\lambda_i}{\sqrt{2\pi}\sigma_i} \left[e^{-\frac{(y+\sqrt{A}-m_i)^2}{2\sigma_i^2}} + e^{-\frac{(y+\sqrt{A}+m_i)^2}{2\sigma_i^2}} \right]$$

şeklinde elde edilmektedir. Burada, $m_i + \sqrt{A} > 0 \quad \forall i \in \{1, \dots, L\}$ eşitsizliği geçerli olduğundan, $y > 0$ durumunda,

$$e^{-\frac{(y-\sqrt{A}-m_i)^2}{2\sigma_i^2}} > e^{-\frac{(y+\sqrt{A}+m_i)^2}{2\sigma_i^2}} \quad \forall i \in \{1, \dots, L\} \quad (12)$$

eşitsizliği elde edilmektedir. Öte yandan, $\sqrt{A} - m_i \geq 0 \quad \forall i \in \{1, \dots, L\}$ eşitsizliği de geçerli olduğundan,

$$e^{-\frac{(y-\sqrt{A}-m_i)^2}{2\sigma_i^2}} \geq e^{-\frac{(y+\sqrt{A}-m_i)^2}{2\sigma_i^2}} \quad \forall i \in \{1, \dots, L\} \quad (13)$$

eşitsizliği elde edilmektedir. Dolayısıyla, $y > 0$ durumunda $p_1(y) > p_0(y)$ sonucu elde edilmektedir. Benzer bir şekilde, $y < 0$ durumunda da $p_1(y) < p_0(y)$ sonucu elde edilebilir. $y = 0$ durumunda ise $p_1(y) = p_0(y)$ olduğu görülmektedir. Sonuç olarak, ML sezici ölçümün sadece işaretine bakarak $\text{sgn}(y)$ şeklinde bit tahmininde bulunacağından, işaret sezicinin optimal olduğu sonucuna varılmaktadır.

Önerme 1'de problem, sinyal gücü ve gürültü bileşenlerinin ortalama değerleri açısından ele alınmış ve belirtilen sonuç elde edilmiştir. Öte yandan, gürültü bileşenlerinin varyans değerleri dikkate alınarak, probleme bir diğer açıdan yaklaşılabilir.

Önerme 2: Aşağıdaki koşulların sağlanması durumunda ve $\sigma_i \rightarrow 0 \quad \forall i \in (1, \dots, L)$ durumunda, denklem (9)'da verilen ortalama hata olasılığı, $P_e^\dagger = 0$ elde edilmektedir.

- $m_i \neq \sqrt{A} \quad \forall i \in \{1, \dots, L\}$
- $m_i - m_j \neq 2\sqrt{A} \quad \forall i \neq j$
- $m_i + m_j \neq 2\sqrt{A} \quad \forall i \neq j$

İspat: Gürültü varyans değerinin çok düşük olduğu durumda, $\sigma_i \rightarrow 0 \quad \forall i \in (1, \dots, L)$, denklem (11)'de verilen koşullu OYF'ler

$$p_1(y) = \sum_{i=1}^L \lambda_i \left[\delta(y - \sqrt{A} - m_i) + \delta(y - \sqrt{A} + m_i) \right] \quad (14)$$

$$p_0(y) = \sum_{i=1}^L \lambda_i \left[\delta(y + \sqrt{A} - m_i) + \delta(y + \sqrt{A} + m_i) \right]$$

şeklinde elde edilmektedir. Denklem (14) incelendiğinde, her iki OYF'nin de $2L$ adet dürtünün toplamı şeklinde olduğu görülmektedir. Gürültü bileşenlerinin ortalama değerleri için verilen koşullar sağlandığında, dürtüler arasında örtüşme olmamaktadır. Bu durumda,

$$\min[\pi_0 p_0(y), \pi_1 p_1(y)] = 0 \quad (15)$$

eşitliği geçerli olduğundan, denklem (9)'da verilen ortalama hata olasılığı, $P_e^\dagger = 0$ elde edilmektedir. Dolayısıyla, ML kurallı sezici için ortalama hata olasılığının '0' değerine eşit olduğu görülebilir.

Gürültü gücü açısından yukarıda belirtilen senaryo tek eşikli sezici için düşünüldüğünde oldukça farklı sonuçlar

elde edilmektedir. Alıcı yapısında tek eşikli sezici kuralı uygulandığında ve sinyal gücü için

$$m_i < \sqrt{A} < m_{i+1}, i \in \{1, \dots, L-1\} \quad (16)$$

koşulu sağlandığında, ortalama hata olasılığı için alt sınır olarak,

$$0.5 \sum_{k=i+1}^L \lambda_k \quad (17)$$

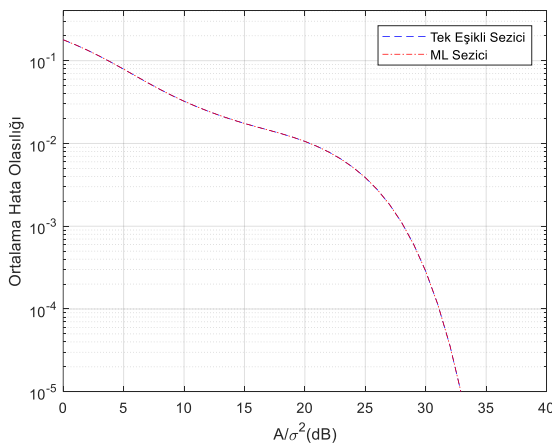
değeri elde edilmektedir [11]. Dolayısıyla, λ_k değerlerine bağlı olarak ortalama hata olasılığı oldukça yüksek sonuçlar verebilmektedir.

Teorik sonuçlar incelendiğinde, her iki sezici için de gürültü bileşenlerinin ortalama değerleri ve ağırlık katsayılarının performansı doğrudan etkilediği anlaşılmaktadır. Öte yandan, gürültü bileşen sayısının doğrudan bir etkisi bulunmamaktadır.

Sayısal Sonuçlar

Bu bölümde, tek eşikli sezici ve ML kurallı sezici ortalama hata olasılığı açısından farklı senaryolar için karşılaştırılmaktadır. Bütün senaryolarda, gürültü bileşenlerinin eşit varyans değerine sahip oldukları kabul edilmektedir ($\sigma_i = \sigma \forall i \in (1, \dots, L)$). Denklem (1)'de verilen sinyal gücü, $A = 1$ olarak belirlenmiştir. A/σ^2 oranı kullanılarak farklı σ değerleri elde edilmiştir. Bütün senaryolarda, gürültü parametreleri belirlenirken önerme 1 ve önerme 2'de belirtilen koşullar dikkate alınmıştır.

İlk olarak, önerme 1'de verilen koşulun sağlandığı durum çalışılmıştır. Gürültü bileşenleri için ortalama değerler $\mathbf{m} = [0.15 \ 0.42 \ 0.60 \ 0.92]$ ve ağırlık katsayıları $\lambda = [0.30 \ 0.06 \ 0.09 \ 0.05]$ olarak seçilmiştir. Bu senaryoda, ortalama hata olasılığı her iki sezici için şekil 1'de sunulmuştur.

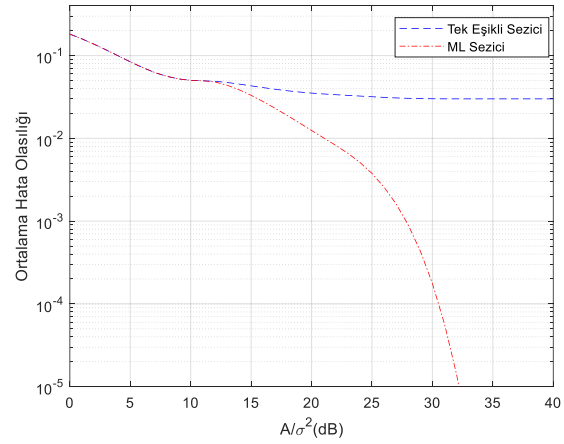


Şekil 1. Tek eşikli sezici ve ML kurallı sezici için ortalama hata olasılıkları, $\mathbf{m} = [0.15 \ 0.42 \ 0.60 \ 0.92]$ ve $\lambda = [0.30 \ 0.06 \ 0.09 \ 0.05]$

Grafik incelendiğinde, her iki sezicinin bütün σ değerleri için aynı performansı gösterdiği gözlemlenmektedir. Bu

senaryo için önerme 1'de verilen koşul sağlandığından ML kurallı sezicinin işaret sezici şeklinde olduğu görülmektedir.

Bir diğer senaryo olarak önerme 1'de belirtilen şartın sağlanmadığı parametre değerleri için çalışılmıştır. Bu senaryo için gürültü bileşen sayısının 10 olduğu durum düşünülmüştür. Bu senaryoda gürültü bileşenleri için ortalama değerler $\mathbf{m} = [0.10 \ 0.32 \ 1.15 \ 1.30 \ 1.50]$ ve ağırlık katsayıları $\lambda = [0.24 \ 0.20 \ 0.03 \ 0.02 \ 0.01]$ olarak seçilmiştir. Bu senaryoda ortalama hata olasılıkları farklı A/σ^2 değerleri için şekil 2'de gösterilmiştir.



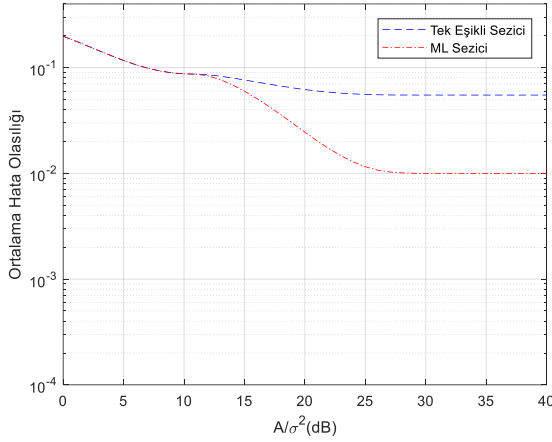
Şekil 2. Tek eşikli sezici ve ML kurallı sezici için ortalama hata olasılıkları, $\mathbf{m} = [0.10 \ 0.32 \ 1.15 \ 1.30 \ 1.50]$ ve $\lambda = [0.24 \ 0.20 \ 0.03 \ 0.02 \ 0.01]$

Grafik incelendiğinde, ML kurallı sezicinin yüksek σ değerleri için tek eşikli sezici ile aynı performansı gösterdiği görülmektedir. Tek eşikli sezici için ortalama hata olasılığının σ değeri azaldıkça monoton olarak azaldığı, bir noktadan sonra ise sabit kaldığı görülmektedir. Tek eşikli sezicinin ulaşabildiği minimum hata olasılığının denklem (17)'de verilen alt sınıra ulaştığı görülmektedir. Ayrıca, tek eşikli sezici için optimal eşik seviyeleri incelendiğinde yüksek σ değerlerinde işaret sezicinin optimal olduğu gözlemlenirken, düşük σ değerlerinde optimal eşik seviyelerinin sıfırdan farklı olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, bu senaryoda Önerme 2'de belirtilen şartların sağlandığı dolayısıyla ortalama hata olasılığının ML kurallı sezici için '0' değerine ulaştığı görülmektedir.

Son olarak, Önerme 2'de belirtilen şartların sağlanmadığı bir senaryo çalışılmıştır. Bu senaryoda gürültü bileşenleri için ortalama değerler $\mathbf{m} = [0.20 \ 0.38 \ 0.50 \ 1.25 \ 1.50]$ ve ağırlık katsayıları $\lambda = [0.23 \ 0.12 \ 0.05 \ 0.09 \ 0.01]$ olarak seçilmiştir. Bu senaryoda ortalama hata olasılıkları farklı A/σ^2 değerleri için şekil 3'de gösterilmiştir.

Önceki grafikler ile karşılaştırıldığında, bu grafikte farklı bir gözlemlenmektedir. ML kurallı sezici için grafik incelendiğinde, ortalama hata olasılığının monoton olarak azaldığı, ancak '0' değerine ulaşmadığı görülmektedir. Gürültü bileşenleri için ortalama değerler incelendiğinde, $m_3 + m_5 = 2\sqrt{A}$ eşitliğinin geçerli olduğu, dolayısıyla Önerme 2'de belirtilen son koşulun sağlanmadığı görülmektedir. Bu durumda, ML kurallı

sezici için ortalama hata olasılığının '0' değerine ulaşamayacağı Önerme 2'de belirtilmiştir.



Şekil 3. Tek eşikli sezici ve ML kurallı sezici için ortalama hata olasılıkları, $\mathbf{m} = [0.20 \ 0.38 \ 0.50 \ 1.25 \ 1.50]$ ve $\boldsymbol{\lambda} = [0.23 \ 0.12 \ 0.05 \ 0.09 \ 0.01]$

ML kurallı sezici ile kıyaslandığında, gürültü parametrelerine bağlı olarak, tek eşikli sezicinin performansının kabul edilemez seviyelerde olabildiği gözlemlenmektedir.

Sonuçlar

Bu çalışmada, ikili haberleşme sistemi, kanal gürültüsünün simetrik Gauss karışım modeline sahip olduğu durum için çalışılmıştır. Tek eşikli sezici ile optimal olan ML kurallı sezici karşılaştırılmış ve tek eşikli sezicinin optimal olduğu yeter koşul sunulmuştur. Bu şartın sağlanmadığı ve gürültü bileşenlerinin düşük güce sahip olduğu durumda ise tek eşikli sezici oldukça yüksek ortalama hata olasılığına sahip olabilirken, ML kurallı sezici için bu değer '0' olduğu şartlar sunulmuştur. Sonuçları, doğrulamak amacıyla sayısal sonuçlar farklı senaryolar için sunulmuştur.

Kaynaklar

- [1] H. V. Poor, An Introduction to Signal Detection and Estimation. New York: Springer-Verlag, 1994.
- [2] M. Azizoglu, "Convexity properties in binary detection problems," IEEE Trans. Info. Theory, vol. 42, no. 4, pp. 1316-1321, July 1996.
- [3] J. G. Proakis and M. Salehi, Communication Systems Engineering, NJ, Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1994.
- [4] V. Bhatia and B. Mulgrew, "Non-parametric likelihood based channel estimator for Gaussian mixture noise," Signal Processing, vol. 87, no. 11, pp. 2569-2586, Nov. 2007.

- [5] E. Kuruoglu, C. Molina, W. Fitzgerald, Approximation of alpha-stable probability densities using finite Gaussian mixtures, in: Proceedings of EUSIPCO 98, Signal Processing IX: Theories and Applications, vol. 2, pp. 989-992, September 1998.
- [6] R.S. Blum, R.J. Kozick, B.M. Sadler, An adaptive spatial diversity receiver for non-Gaussian interference and noise, IEEE Trans. Signal Process. 47 (August 1999) 2100-2111.
- [7] S. Verdú, Multiuser Detection. 1st ed. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1998.
- [8] A. Das, N. G. Stocks and A. Nikitin, "Quantifying stochastic resonance in a single threshold detector for random aperiodic signals", Fluctuation and Noise Letters, vol. 2, pp. L247-L265, 2004.
- [9] P. R. Prucnal, "Single-threshold processing for orthogonal likelihood-ratio detection with application to FSK fiber-optic communications", IEEE Trans. Commun., vol. COM-29, pp. 743-749, May 1981.
- [10] P. R. Prucnal and M. C. Teich, "Single-threshold detection of a random signal in noise with multiple independent observations. 1: Discrete case with applications to optical communications", Appl. Opt., vol. 17, no. 22, pp. 3576-3583, Nov. 1978.
- [11] S. Bayram and S. Gezici, "On the performance of single-threshold detectors for binary communications in the presence of Gaussian mixture noise", IEEE Trans. Commun., vol. 58, no. 11, pp. 3047-3053, Nov. 2010.
- [12] C. Goken, S. Gezici and O. Arikan, "Optimal signaling and detector design for power-constrained binary communications systems over non-Gaussian channels", IEEE Commun. Lett., vol. 14, no. 2, pp. 100-102, Feb. 2010.
- [13] M. E. Tutay, S. Gezici and O. Arikan, "Optimal randomization of signal constellations on the downlink of a multiuser DS-CDMA system", IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 12, no. 10, pp. 4878-4891, Oct. 2013.
- [14] B. Hu and N. C. Beaulieu, "On characterizing multiple access interference in TH-UWB systems with impulsive noise models", Proc. IEEE Radio Wireless Symp., pp. 879-882, 2008-Jan.
- [15] V. Cellini and G. Dona, "A novel joint channel and multi-user interference statistics estimator for UWB-IR based on Gaussian mixture model", Proc IEEE Int. Conf. Ultra-Wideband (ICUWB), pp. 655-660, 2005-Sep.



Different DC-Link Control Methods with Multilevel Inverter for Low Harmonic and Efficient Power Transfer in Grid-Tied Hydrogen Fuel Cell Systems

Beyzanur GÖNCÜ¹, Ünal YILMAZ^{2*}

¹ Harran University Electrical-Electronics Engineering Department, beyzanurgoncu@gmail.com, Orcid No: 0009-0009-0319-0755

² Harran University Electrical-Electronics Engineering Department, uyilmaz@harran.edu.tr, Orcid No: 0000-0003-3993-9309

ARTICLE INFO

Article history:

Received 6 May 2023
Received in revised form 13 June 2023
Accepted 14 June 2023
Available online 20 June 2023

Keywords:

PEMFC, DC-Link Control,
Multilevel Inverter, Grid-Tied
Systems

Doi: 10.24012/dumf.1293293

* Corresponding author

ABSTRACT

In grid-connected power generation systems, dc-link voltage control is needed to prevent energy losses, reduce voltage fluctuations and provide a stable energy flow. In addition, control of the power factor via the voltage source inverter is a process that supports the efficient use of the energy produced. Moreover, keeping the total harmonic distortion (THD) of the current injected into the grid in accordance with IEEE-519 harmonic standards (<5%), will increase the quality of the grid electrical current. In this study, three different methods (cascade pi-based, adaptive neuro fuzzy and artificial neural networks methods) were proposed for dc-link control. In addition, due to its high power factor (PF) and low harmonic distortion performance, a three-level neutral point clamped (NPC) inverter is modeled for grid-tied proton-exchange membrane fuel cells (PEMFC). The rated power of the proposed system is 50 kW and the system was tested under five different operation scenarios. According to the performance results, the THD in the grid current has been reduced from 8.02% to 3.52% compared to traditional methods, dc-link voltage ripple was observed to be around 1V (<1%), and also the power factor regulation performance increased as unity (>0.99).

Introduction

In recent years, increasing technological developments as well as environmental and climatic concerns around the world have led the scientific world to new research in areas such as the use and control of renewable energy sources. Since renewable energy sources are affected by natural phenomena, inevitable performance differences can make power output uncertain and sometimes impossible to use. Considering all these, the PEMFCs are a serious candidate solution, which is highly efficient, noiseless and environmentally friendly as it does not have any moving parts and at the same time providing flexibility in controllable power output [1]. Due to the stated advantages of PEMFCs, there are many existing application areas such as aircraft, spacecraft and automobiles. In addition, especially in recent years, PEMFCs have started to be used in single-phase and three-phase electricity grid integration applications [2], [3]. When the grid-connected power circuit topologies are examined, it is seen that a dc-dc converter is used to regulate the voltage of the dc energy produced by the fuel cells and a power interface unit consisting of dc-ac inverters is used to inject the electrical energy produced as dc into the ac grid. In addition, the total harmonic distortion of the current injected into the grid

should be limited to 5% in accordance with IEEE-519 standards. Therefore, the output of dc-ac inverters is equipped with harmonic damping filters (L, LC, LCL etc.) in order to comply with the grid connection standard [4]. Another factor as important as suppressing the harmonic distortion of the current injected into the grid is the control of the active and reactive power injected into the grid. While active power is defined as power capable of doing useful work, reactive power flow adversely affects energy and transmission capacity and can also cause voltage drop. In order to overcome this situation, the power factor should be controlled and the reactive power needs should be adjusted at the distribution level [5].

According to traditional inverter topologies, multi-level inverters consist of cascade submodules that reduce energy losses and electromagnetic interference as it improves waveform quality. Three-level NPC inverters, one of the multi-level inverter topologies, have become interesting because they have low voltage stress in power circuits, lower total harmonic distortion, and high efficiency [6], [7]. The energy obtained from hydrogen fuel cells is converted with the help of a dc-dc converter. Voltage fluctuations and energy losses may occur during this conversion process. Also, the input voltage of the

inverter has to be checked to keep it constant at the specified reference voltage. In this context, for dc-link control, three different control methods (two closed-loop with pi, anfis-based and ann-based) are used in this study. Although pi controller has several advantages such as simple structure and easy implementation, they are known to have a significant time delay problem and poor control performance. On the other hand, while fuzzy logic control is an alternative and effective solution for the analysis of complex, nonlinear and ill-defined systems, artificial neural networks is defined as an intelligent system that has effective advantages such as learning, adaptation, speed. Moreover, adaptive neuro-fuzzy inference system technique has taken its place in the literature as a hybrid research alternative that incorporates efficient solution proposals of

fuzzy logic and artificial neural network methods [8], [9]. In this study, a three-phase structure is designed for the grid connection of hydrogen fuel cells. Instead of traditional inverters, NPC three-level inverter and three different dc-link control methods are used for dc-link control. Performance analyzes of the proposed system were carried out under different operating conditions, under sudden changing conditions and at different temperatures. The proposed circuit structure consists of power supply (PEM Fuel cell), dc-link, multi-level inverter, LCL harmonic suppression filter, control structures and is presented in Fig.1. in detail. Matlab/Simulink simulation program was used for the analysis and circuit setup of the proposed system.

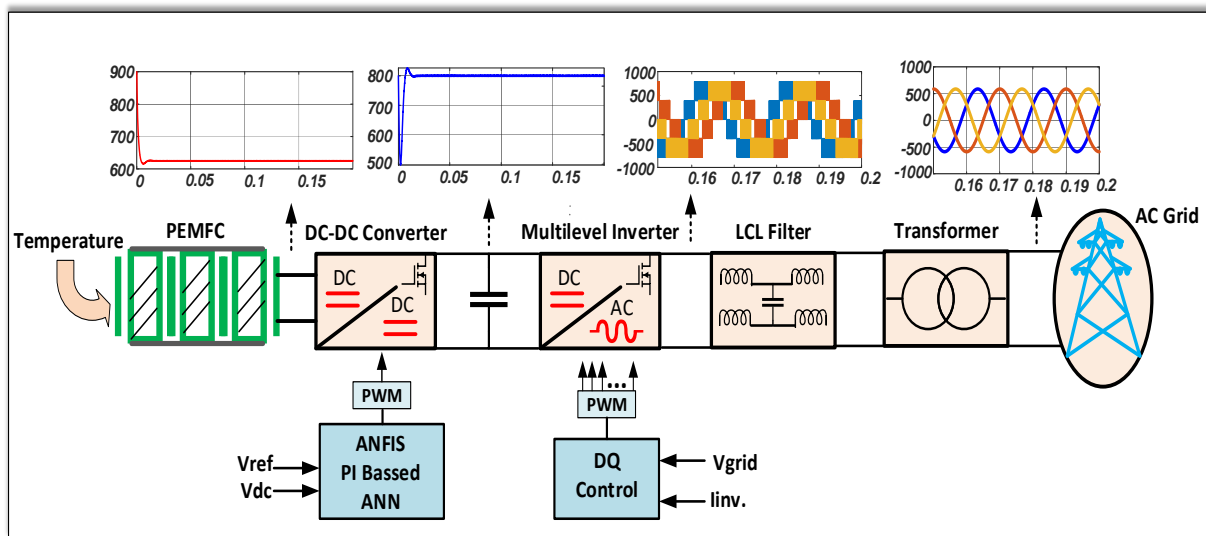


Figure 1. Proposed system for grid-connected PEMFC

Overview of the Literature

Meeting the requirements such as low harmonic distortion, high power factor performance and reactive power balancing, dc-link control, low economic cost, optimization of power circuits as much as possible in order to inject the energy produced by fuel cells into the grid with high efficiency and reliability. When the literature studies are examined, it is seen that studies on fuel cells generally focus on control structures, economical optimization methods, power circuit topologies, and grid failures. Literature studies are detailed in table 1. In ref [10], a multilevel inverter is modeled in order to reduce the number of circuit elements and expand the output voltage level. At the same time, the number of switches has been reduced compared to traditional topologies, thus reducing the switching losses. The total harmonic distortion in the load current was measured as 5.46%. The proposed study has been tested both in a simulated environment and in a laboratory environment. In ref [11], a three-level diode clamped inverter is designed for a multi-stack fuel cell. The aim of the proposed study is to provide energy transfer at low total harmonic distortion

level and to reach 85% efficiency. For the proposed study, 1.54 MW/1400 V_{dc} prototype was studied. In Ref [12], an MPPT method is designed to increase the power output by using a FC coupled system ANFIS technique. This designed method provides a significant advantage in reducing the consumption. The proposed FC system was tested with a power rating of 1.9 kW and a dc-dc converter together with an independent system efficiency is 98%. In Ref [13], using the ANFIS method, a concurrently developed control scheme is designed for power transfer between the electrical grid and the battery energy storage system. The proposed scheme allows charging and discharging the battery with bidirectional converter. Simulation studies of the system were carried out on the AC network with a power of 293 W. In Ref [14], a new pulse modulus expansion method with a two-level inverter is proposed. The proposed system provides significant advantages in reducing the harmonics of the inverter connected to the grid, regulating the maximum power output and power factor. In the system, the output current harmonic distortion rate for the two-level inverter is 2.05%, and the harmonic distortion rate for the new PWM scheme is 1.55%.

Table 1. Literature Overview

Subject	Objectives	Rated Power	Energy Source	Ref.
Control Structure	Active reactive power control and low THD	6 kW	PEM Fuel Cell	[5]
	Minimize curtailing renewable resources	3.5 MW	SO Fuel Cell	[15]
	Active reactive power control and low THD	1.2 MW	Fuel cell	[16]
	Improve dynamic voltage response, reduce THD, increase power quality	---	SO Fuel Cell	[17]
	Eliminate input current ripple and reduce THD	1.5 kVA	PEM Fuel Cell	[18]
	Mathematical solution for grid connected fuel cell	≈8 kW	Fuel cell	[19]
	Active reactive power control and THD reduction	6 kW	PEM Fuel Cell	[20]
Circuit topology	Modular-Multilevel converter and mitigate THD	6 kW	PEM Fuel Cell	[21]
Feasibility	Optimisation for reducing capital and operating expenses	71 kW	SO Fuel Cell/Hybrid	[22]
	Optimisation for economic profit	---	Fuel cell vehicle to grid	[23]
	Optimisation for economic profit	0.8 kW	SO Fuel Cell/Hybrid	[24]
Grid Failures	Maximum power extraction method that also performs in case of grid failure mode	≈ 25kW	PEM Fuel Cell	[25]
Both control structure and Circuit topology	dc-link Control, active&reactive power control and low THD	50 kW	PEM Fuel Cell	Proposed

Some of the important issues that fuel cells must overcome in order to inject energy into the grid accurately and reliably are the elimination of reactive power and low total harmonic distortion (must comply with IEEE-519 standards). The proposed study consists of two stages. In the first stage, the voltage of the dc energy obtained from PEMFC is increased to the determined reference value with the help of dc-dc converter. In addition, it is controlled by three different dc-link control methods in order to prevent voltage fluctuations and to provide an efficient energy flow. In the second stage, dc energy is converted to ac energy with the help of multi-level inverter. This conversion process; In order to have low harmonic distortion and high power factor, dq- control method is used. Finally, the LCL harmonic suppression filter was designed and energy was supplied to the electricity grid. The three-phase system model is designed with control structures to inject the energy from PEMFCs into the grid. Instead of the traditional inverter model and pi-based dc link control method, a multi-level inverter and three different dc link control algorithms are designed. Thanks to the proposed system, it has been determined that the suppression performance of the current harmonics injected into the grid and the power factor regulation are improved compared to the traditional method. In this case, the energy injected into the grid is more efficient and of higher quality. In order to ensure low voltage fluctuation and efficient energy flow, three different methods

have been applied for DC-link control: ANFIS-based, ANN-based and two closed-loop pi-based. The purpose of applying these methods is to perform performance analysis of traditional methods (pi-based) and intelligent methods (ANFIS and ANN-based). To confirm the accuracy of the proposed system and control methods have been tested under different and suddenly changing operating conditions and performance analysis has been carried out under different temperatures. LCL Harmonic suppression filter is designed and applied to the output of the NPC three-level inverter in order to prevent possible electrical faults and to improve the electrical quality.

Material and Methods

Before injecting the dc energy produced by the fuel cells into the grid, power electronics interface circuits are needed. They consist of a dc-dc converter to control the input voltage level of the inverter and then an inverter to convert dc energy to ac energy. Finally, a filter circuit is needed to perform harmonic suppression between the inverter and the grid.

Fuel Cell Stack and DC-Link Control

Fuel Cells are devices that convert the chemical energy they contain into dc electrical energy as a result of electrochemical reactions. Considering its low noise, high power density, high efficiency and low pollution, PEMFC has become one of the most popular fuel cells [16]. The equivalent circuit of the PEM fuel cell is shown in Fig. 2 [2].

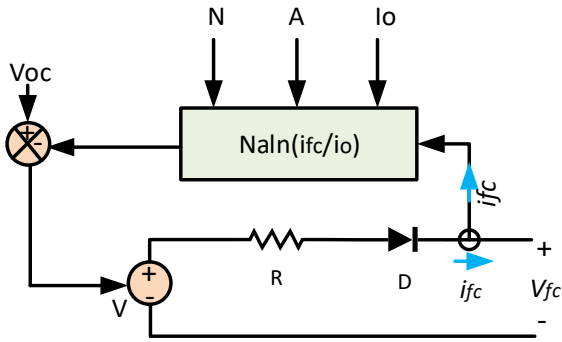


Figure 2. Electrical circuit equivalent of a PEM fuel cell

The voltage value produced by the fuel cell can be found by following expression.

$$V_{fc} = V_{oc} - V_R - V_d \tag{1}$$

The open-circuit voltage can be found from the following equation.

$$V_{oc} = K_C \left[V_o + (T - 298) \frac{-44,43}{zF} + \frac{R_C T}{zF} \ln (PH_2 PO_2^{1/2}) \right] \tag{2}$$

Resistive and the absolute polarization overvoltages can be calculated with the following equations.

$$\left\{ \begin{array}{l} V_R = i_{FC} \times R \\ V_d = N \times A \times \ln (i_{FC}/i_o) \end{array} \right\} \tag{3}$$

If the expressions in the above equations are defined; V_{fc} is the output voltage of the fuel cell, V_R is the voltage loss on the resistor, V_d is the absolute polarization voltage loss, N is the number of cells in the fuel cell, A is the tafel slope and i_o is the current exchange [2]. The number of cells used in this study was determined as $N=900$, rated voltage 625 V and rated power 50kW. The current, voltage and power characteristics of the fuel cell used in this study and the relationship between each other are presented in Fig. 3.

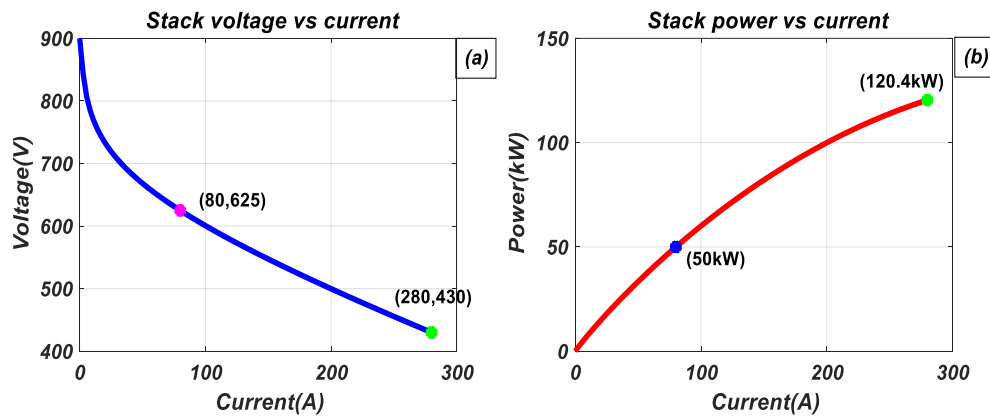


Figure 3. PEMFC Characteristic Curves

The electrical properties and characteristic values of PEMFC used as an energy source are presented in Table 2.

Table 2. PEMFC electrical characteristics.

PEMFC Fuel Cell Model and Operating Properties	
Matlab Model	PEMFC-50kW-625Vdc
Current at nominal operating point (A)	80 A
Voltage at nominal operating point (V)	625 V
Current at maximum operating point (A)	280 A
Voltage at maximum operating point (V)	430 A
Fuel cell nominal power (W)	50 kW
Fuel cell maximum power (W)	120.4 kW
Fuel cell resistance (Ω)	0.664 Ω
Number of Cells	900
Nominal stack efficiency (%)	55%
Operating temperature (°C)	65°-70°
Nominal air flow rate (lpm)	2100 lpm
Maximum air flow rate (lpm)	7350 lpm
Fuel nominal supply pressure (bar)	1.5 Bar
Air nominal supply pressure (bar)	1 Bar
Nominal fuel consumption (slpm)	501.8 (slpm)
Nominal air consumption (slpm)	1194 (slpm)

Since the dc energy produced by fuel cells depends on many parameters, connecting it directly to the inverter may cause voltage drops and irregular energy flow. Therefore, as shown in Fig. 4, a dc-dc converter is used between the inverter and the fuel cell. Due to the low number of circuit elements, easy installation, effective and efficient operation, dc-dc boost converter was used in this study. The rated voltage of the fuel cell, 625V, was applied three different dc-link controlled dc-dc boost converters to keep the output at 800V and to feed the input of the NPC multi-level inverter.

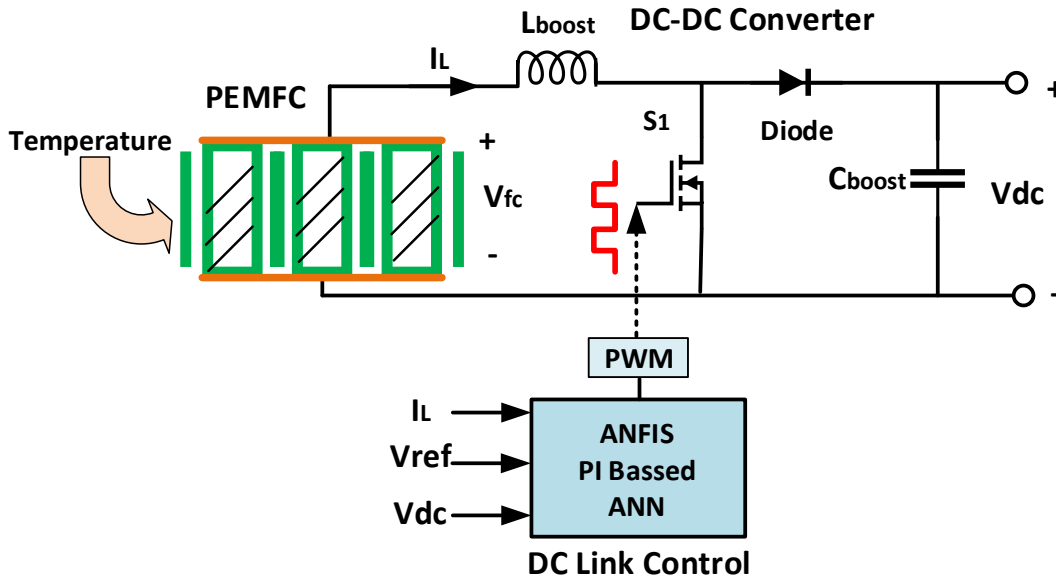


Figure 4. DC Link Control Methods

The relationship between the output voltage of the boost converter and the voltage of the fuel cell is presented below.

$$\frac{V_{dc}}{V_{fc}} = \frac{1}{1-D} \quad (4)$$

$$L_{boost} = \frac{V_{fc}D}{\Delta i_L f_s} \quad (5)$$

$$C_{boost} = \frac{D}{R(\Delta V_{dc}/V_{dc})f} \quad (6)$$

V_{boost} is the output voltage of the dc-dc boost converter, and V_{fc} is the fuel cell voltage, and D is expressed as the duty-cycle of the PWM signal feeding the gate of the semiconductor switch (IGBT).

ANFIS Based DC Link Control

ANFIS-based control structure has been designed for current control after dq conversion and consists of 5 different layers. The ANFIS-based control structure is shown in Fig. 5.

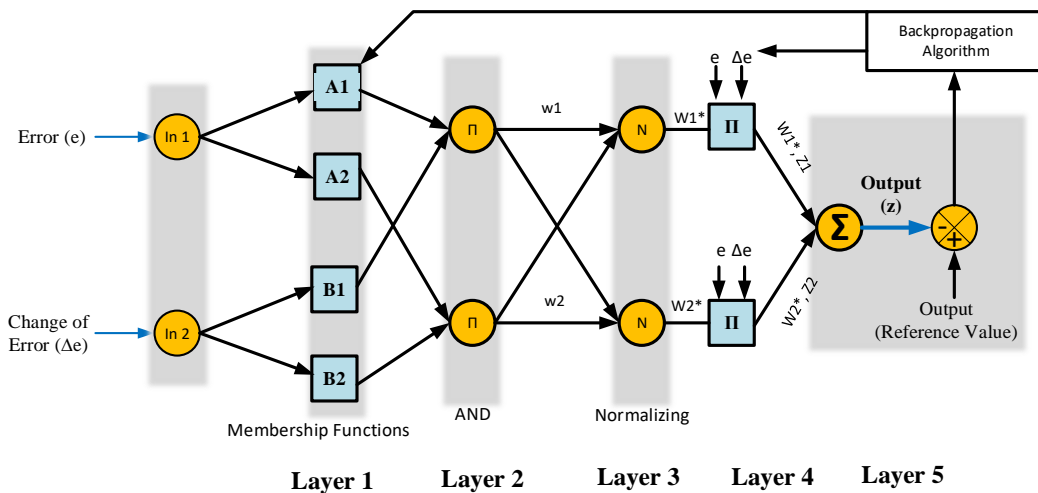


Figure 5. Adaptive Neuro Fuzzy Inference System Structure

ANFIS-based control system is designed to generate duty cycle of pwm signal at the output. Accordingly, the error between the voltages ($V_{dcref}-V_{dcLink}$) and the rate of change of the error according to time ($d(V_{dcref}-V_{dcLink})/dt$) are given to the input of ANFIS.

$$\left\{ \begin{array}{l} e(t) = V_{dc}(ref) - V_{dcLink} \\ \Delta e(t) = d(V_{dc}(ref) - V_{dcLink})/dt \end{array} \right\} \quad (7)$$

Layer 1: In this layer, membership degrees are generated for the input vectors (ai). (i=1,2,3.)

$$Q_1^1 \rightarrow \mu_{Ai}(e) \begin{cases} 0 & e \leq ai \\ \frac{e-ai}{bi-ai} & ai \leq e \leq bi \\ \frac{ei-e}{ei-bi} & bi \leq e \leq ei \\ 0 & ei \leq e \end{cases} \quad (8)$$

Layer 2: Three membership functions are created for each input, and a total of 3x3=9 different rules are created. The properties of the input and output membership functions are shown in Fig. 6 (NB means negative, ZE means zero and PB means positive) [26], [27].

$$Q_i^2 \rightarrow W_i = \min (\mu_{Ai}(e) \cdot \mu_{Bi}(e)) \quad (9)$$

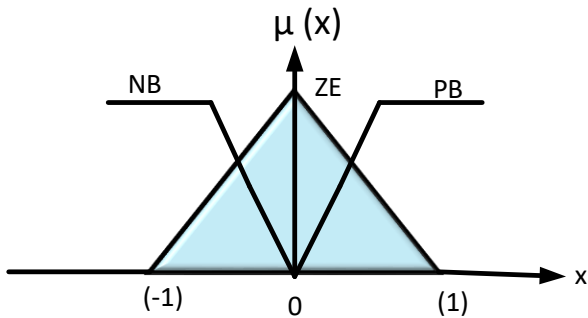


Figure 6. Input and output membership function

Layer 3: In this layer, the ratio of the activation level of each rule to all activation levels is calculated.

$$Q_i^3 \rightarrow \bar{W}_i = \frac{W}{\sum_{j=1}^N W_j} \quad (10)$$

Layer 4: In this layer, the contribution of each layer to the total output is calculated with the following function.

$$Q_i^4 = \bar{W}_i Z_i = \bar{W}_i (k_i e + m_i \Delta e + s_i) \quad (11)$$

Layer 5: In this layer, the sum of the contribution of all rules is calculated.

$$Q_i^5 = \sum_{i=1}^2 \bar{W}_i Z_i = \frac{w_1 Z_1 + w_2 Z_2}{w_1 + w_2} \quad (12)$$

If the expressions in the above equations are defined; e represents error, Δe error rate of change with time, N data number, k, m and s design parameters, w weights, z output, μ(X) membership function and Q represents layers [26], [27].

ANN Based DC Link Control

In this study, an artificial neural network model is designed to control the dc link voltage. Input layer; It consists of reference voltage (Vref) and dc link (Vdc Link) voltage, while the duty cycle is produced for the PWM signal in the output layer. A hidden layer with 10 neurons is designed between the input layer and the output layer. The designed artificial neural network is presented in detail in Fig. 7 [28].

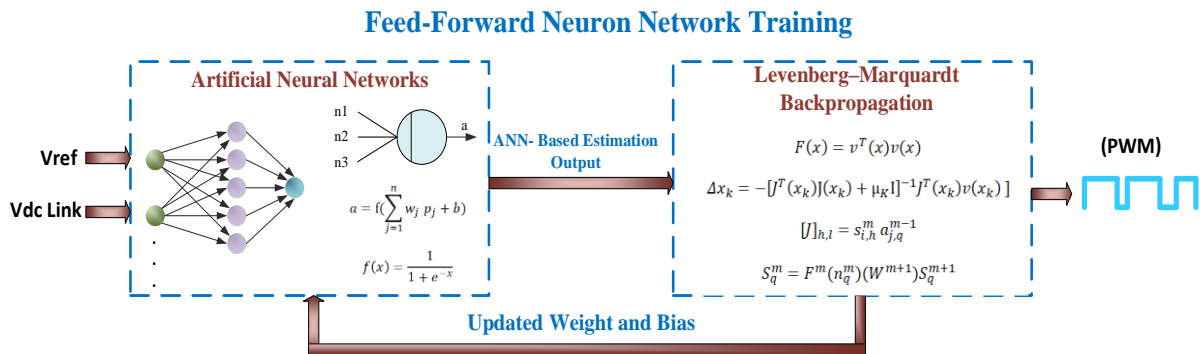


Figure 7. Feed forward artificial neural networks structure

The basic element of artificial neural networks can be defined as mathematically and logically modeling the functions of biological neurons. The input layer vector of the designed neuron is $p = [p_1, p_2, \dots, p_R]$, and w_1, w_2, \dots, w_j are weighted by the elements of the W weight matrix, respectively. The neuron has bias (b), which is arranged by adding up with the weighted inputs of the neuron, forming the net inputs of n [29].

$$n = \sum_{j=1}^R w_j p_j + p = W_p + b \quad (13)$$

After the input layer is weighted and added with bias, it is passed through the activation function.

$$a = f(n) \quad (14)$$

The tan-sigmoid activation function was used for this study and is presented as follows.

$$f = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (15)$$

The following data creation software in matlab simulation program to generate input and target dataset for DC link control

Matlab Dataset Codes

```

Vinput=randi([400 10 650], 1, 100000);
Voutput=randi([650 10 900], 1, 100000);
Duty=(Voutput-Vinput)/Voutput;
Input=[Vinput;Voutput];
Output=Duty;
    
```

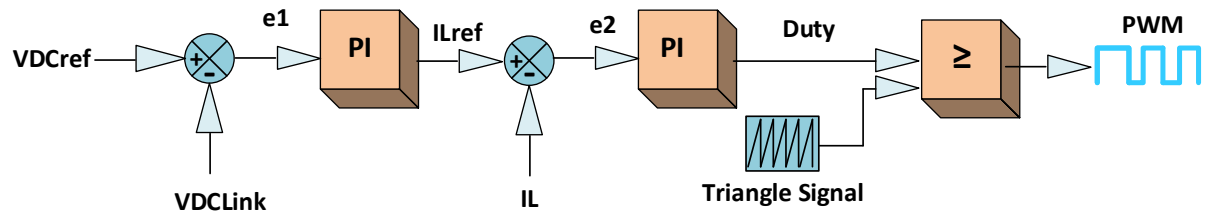
Two Closed Loop pi-based DC Link Control


Figure 8. Two closed loop dc link control methods based on PI

Expressed mathematically, the first pi control establishes the reference value for the inductance current [30], [31], [32].

$$I_{Lref} = K_{p1}e_1 + K_{i1} \int e_1 dt \quad (16)$$

Where;

$$e_1 = V_{DCref} - V_{Dclink} \quad (17)$$

I_{Lref} can be defined with the following expression.

$$I_{Lref} = \frac{V_{DCref}^2}{RV_{FC}} \quad (18)$$

The error rate for the second closed loop is expressed by the following equation.

$$e_2 = K_{p2}e_2 + K_{i2} \int e_2 dt \quad (19)$$

Where;

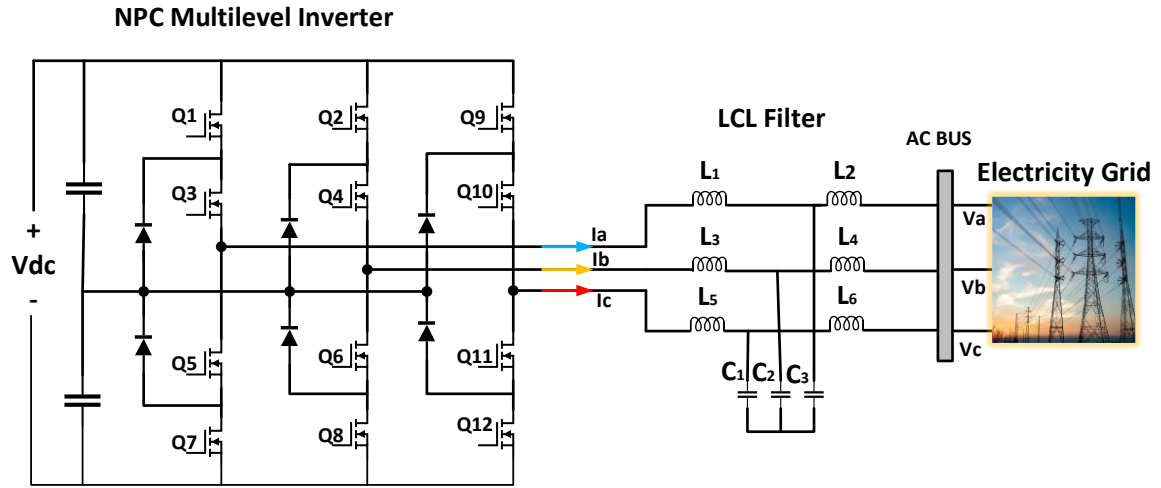
$$e_1 = I_{Lref} - I_L \quad (20)$$

In this study, pi-based dc-link control method with two closed loops was used. In this control method, three parameters, dc-link voltage, reference voltage value and inductance current, are used. The error rate is found by taking the difference between the reference voltage and the dc link voltage, then the reference current for the inductance current is found by passing the pi control. The error rate is found by taking the difference between the reference current and the inductance current, and the duty cycle of the pwm signal to be produced is determined by passing this error rate again through the pi control. Finally, the determined duty cycle is compared with a triangular signal and the pwm signal is generated for the switching element. It is detailed in Fig. 8.

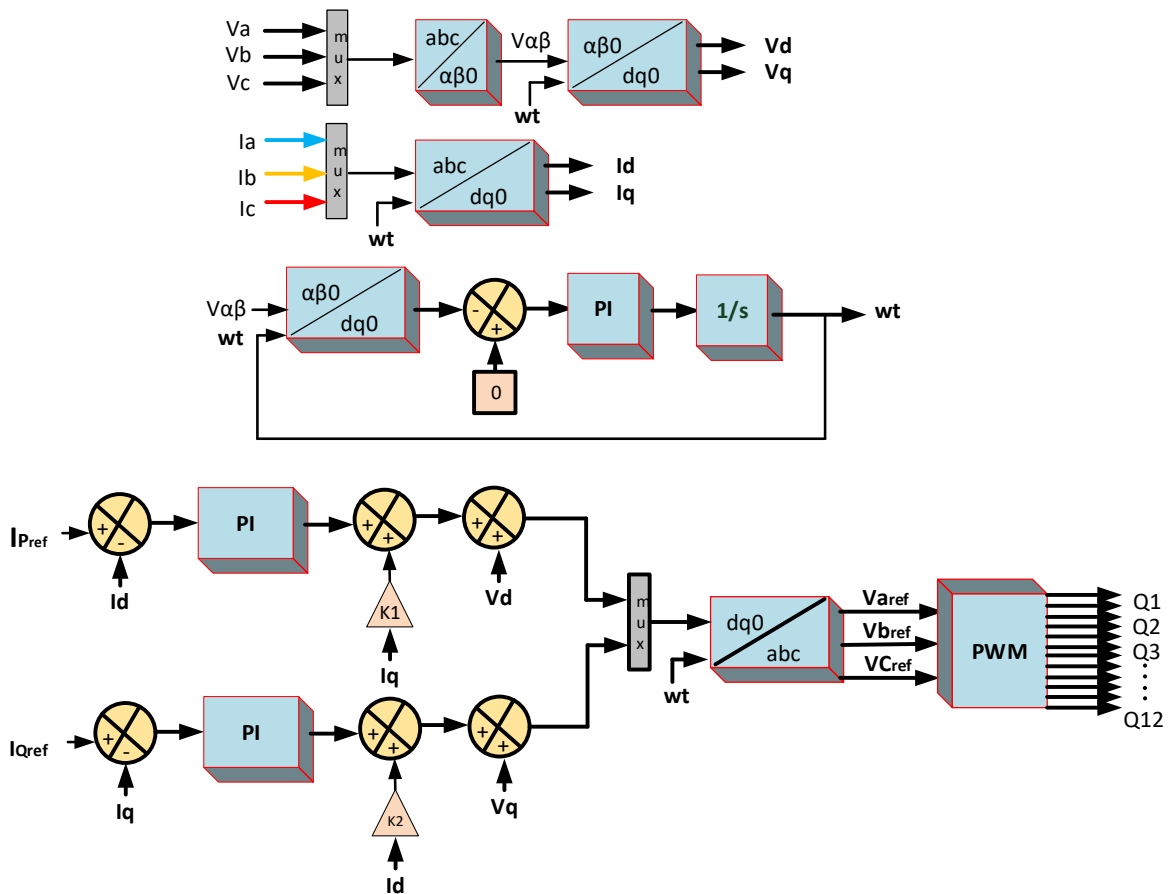
If the parameters given in the equations are defined, e_1 is the first closed loop error rate, e_2 is the second closed loop error rate, I_{Lref} inductance current reference value, V_{DCLink} dc link voltage, V_{DCref} , dc link reference voltage, I_L inductance current, V_{FC} fuel cell voltage.

Three Level NPC Inverter with Control method

After the dc energy produced by PEMFC is controlled by the dc-dc boost converter and given to the dc-link, this dc energy is used as the input voltage of the NPC three-level inverter. The designed inverter and LCL filter convert dc energy into ac energy to inject it into the grid at low harmonic level. Active reactive power control is performed by synchronizing the grid current and voltage and the signals generated from the inverter output with the dq-based control method. The designed NPC three-level converter LCL filter and dq-based control method are presented in Fig. 9.



(a)



(b)

Figure 9. Designed NPC Three-Level Inverter (a) DQ based Control Method (b)

The following procedures should be followed to determine the current and voltage equations of the grid-connected NPC three-level inverter and the dq conversion equations of the three-phase system [6], [33]-[34].

Voltage equations can be written as;

$$\begin{cases} u_a = U \cos(\omega t) \\ u_b = U \cos(\omega t - 2\pi/3) \\ u_c = U \cos(\omega t + 2\pi/3) \end{cases} \quad (21)$$

If the dq rotating frame is applied as the transform method in the three-phase system (abc), the following equation can be written (The x's in the equation can be thought of as current or voltage.). abc→dq transform [6], [33]-[34];

$$\begin{bmatrix} X_d \\ X_q \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\omega t & -\sin\omega t \\ \cos(\omega t - 120^\circ) & -\sin(\omega t - 120^\circ) \\ \cos(\omega t + 120^\circ) & -\sin(\omega t + 120^\circ) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \quad (22)$$

The current equations can be written as:

$$i_d = \sqrt{\frac{2}{3}} (i_a \cos\omega t + i_b \cos(\omega t - 120^\circ) + i_c \cos(\omega t + 120^\circ)) \quad (23)$$

$$i_q = -\sqrt{\frac{2}{3}} (i_a \sin\omega t + i_b \sin(\omega t - 120^\circ) + i_c \sin(\omega t + 120^\circ)) \quad (24)$$

Similarly, the voltage equations can be written as:

$$V_d = \sqrt{\frac{2}{3}} (V_a \cos\omega t + V_b \cos(\omega t - 120^\circ) + V_c \cos(\omega t + 120^\circ)) \quad (25)$$

$$V_q = -\sqrt{\frac{2}{3}} (V_a \sin\omega t + V_b \sin(\omega t - 120^\circ) + V_c \sin(\omega t + 120^\circ)) \quad (26)$$

For the grid connection of the three-phase system after the ANFIS controller, instead of the previous abc→dq conversion, dq→abc conversion is required to generate reference voltages. Therefore, the following equation is used for the conversion process.

$$\begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\omega t & -\sin\omega t \\ \cos(\omega t - 120^\circ) & -\sin(\omega t - 120^\circ) \\ \cos(\omega t + 120^\circ) & -\sin(\omega t + 120^\circ) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_d \\ X_q \end{bmatrix} \quad (27)$$

After the three-phase reference voltages (V_{aref} , V_{bref} , V_{cref}) are produced, the control process is completed by generating PWM signals for the semiconductor switching elements (IGBT) of the NPC three-level inverter by comparing them with the frequency determined sawtooth signal.

LCL Filter Design

An LCL filter is designed between the three-level NPC inverter and the grid to suppress current harmonics. The equivalent circuit of the three-phase filter designed for each phase is presented in Fig. 10.

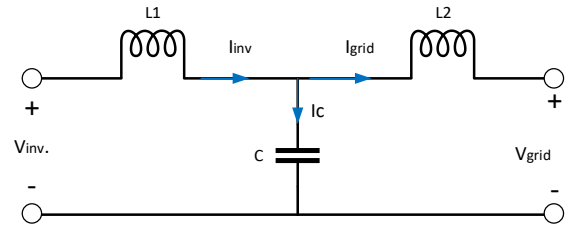


Figure 10. LCL Filter equivalent Circuit

The transfer function between the grid current and the inverter voltage is expressed in the following equation [35].

$$\frac{I_g(s)}{V_{inv}(s)} = \frac{1}{L_1 L_2 C s^3 + (L_2 + L_1) s} \quad (28)$$

In this study, it was calculated as $L_1=L_2=500\mu\text{H}$, $C=100\mu\text{F}$. The dynamic response of frequency, magnitude and phase according to the inductor and Fig. 11.

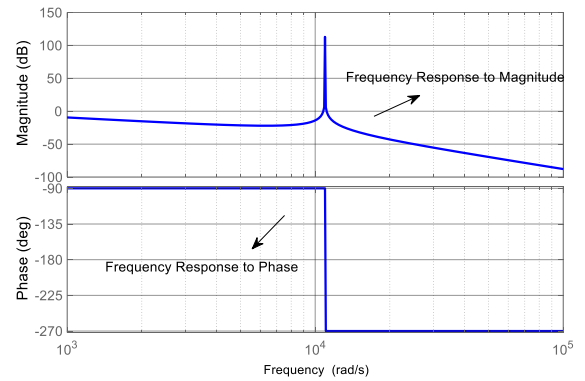


Figure 11. Bode Diagram of LCL filter

The electrical characteristics and circuit parameters of the designed system are presented in Table 3.

Table 3. Circuit Parameters and electrical characteristics.

Parameters	Values
P_{rated}	50 kW
V_{fuel}	625 Vdc
V_{dclink}	800 Vdc
f_s	20 kHz
K_{p1}	0.9
K_{i1}	5
K_{p2}	0.02
K_{i2}	5
f	50 Hz
L_{boost}	1.07 mH
C_{boost}	20 mF
L_{1filt}	500 μH
C_{filt}	100 μF
L_{2filt}	500 μH
T_{fuel}	65°C-70 °C

Results and Discussion

In this study, 5 different operating conditions were modeled to confirm the accuracy of the proposed system and detailed analysis was performed in all operating conditions. 50kw, 625V PEMFC matlab model was used as energy source in the study. In the first operating condition, no reactive power was requested to the grid and only active power was tried to be injected. In this operating condition, the phase angle between the mains current and voltage is measured as 2.7° and the power factor is >0.99 . In the second operating condition, the active power demand was reduced abruptly and it was expected that reactive power would not be injected into the grid. In this operating condition, the phase angle is

measured as 2.09° and the power factor is >0.99 . In the third operating condition, active power was kept constant and reactive power was expected to be injected into the grid. In this condition, the phase angle was measured as 11.1° and the power factor as >0.98 . In the fourth operating condition, more reactive power is expected to be injected into the grid by keeping the active power constant. In this operating condition, the phase angle was measured as 21.12° and the power factor was measured as >0.93 . In the fifth operating condition, it was expected that the work would suddenly return to its initial state. In this operating condition, the phase angle is measured as 2.7° and the power factor is >0.99 . Three mains currents in five different situations are presented in Fig. 12.

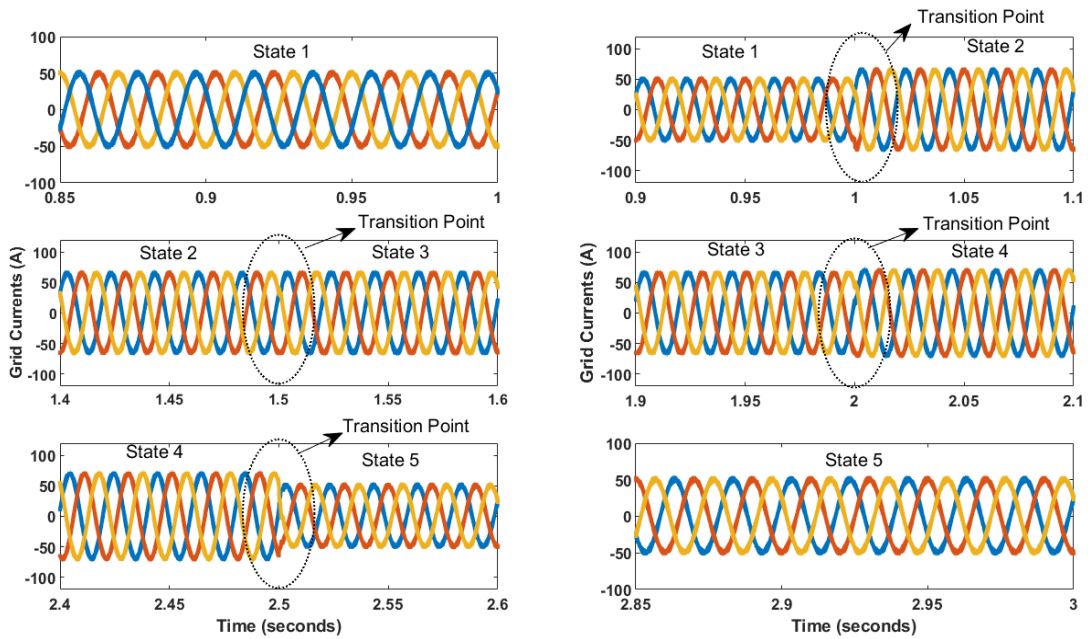


Figure 12. Grid Current under five different operating States

The performances of dc link control methods on power factor were compared under five different operating conditions. The order of convergence times from best to worst: two closed-loop-based, ann-based, and ampis-based. The effects of different dc link control methods on power factor are presented in Fig. 13. In the system designed using dc link control methods and three-level NPC inverter in five different situations, the total harmonic distortion values in the grid current were measured and presented in detail in Fig. 14 and Table 4.

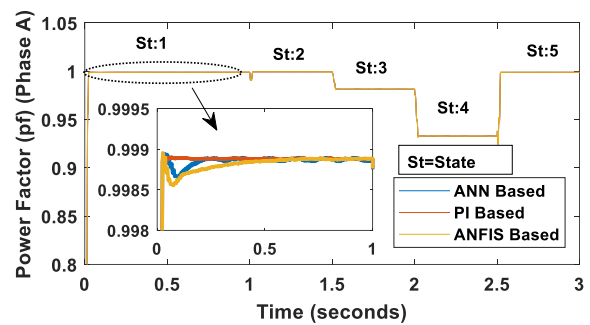
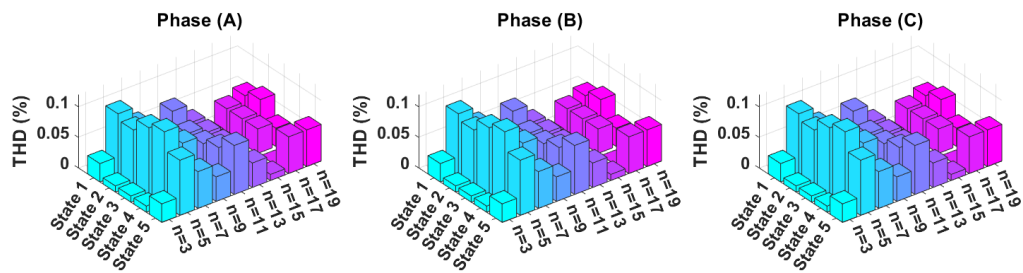
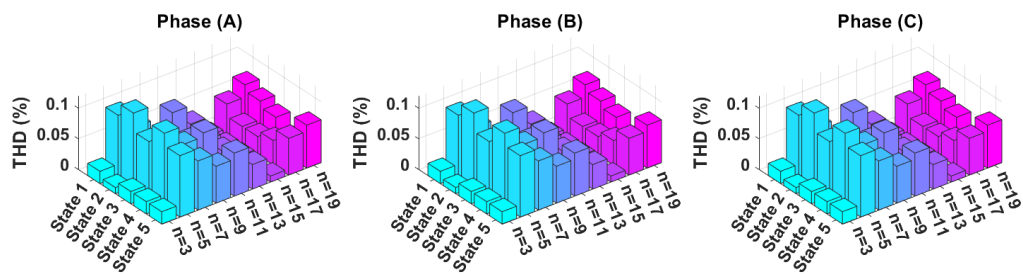


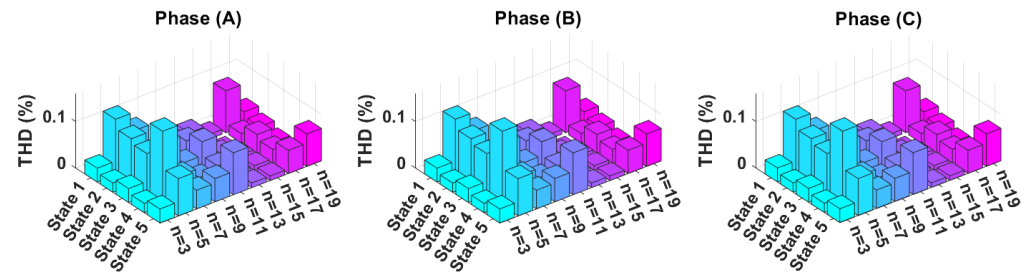
Figure 13. Effect of DC Link control methods on power factor



(a)



(b)



(c)

Figure 14. The effect of the proposed system on the harmonics in the grid current, Two closed loop pi (a) ANFIS (b) ANN (c)

Comparison of the harmonic distortion in the grid current in five different conditions of the system designed using a conventional inverter and a multilevel inverter is presented in Fig. 15. It is seen that the

harmonic distortion performance of the multilevel inverter over the conventional inverter is superior in all conditions.

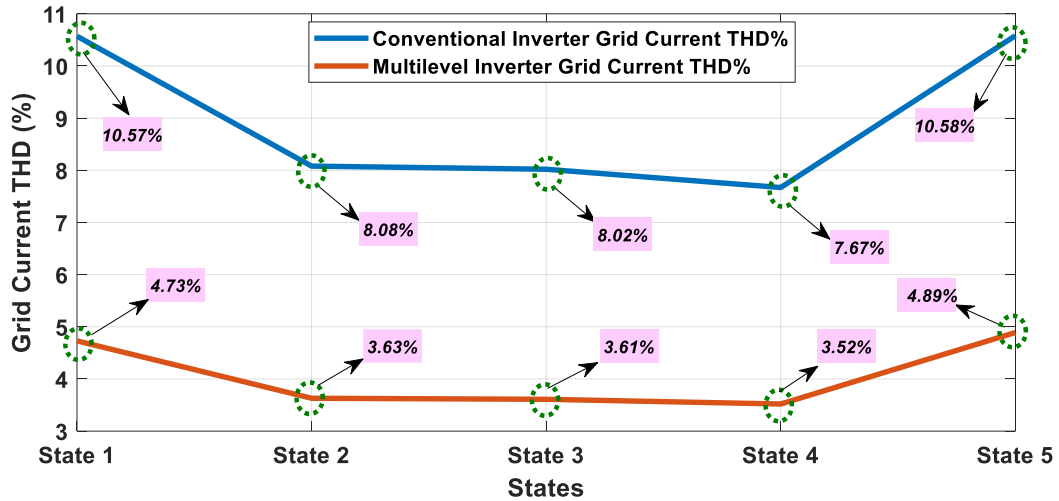


Figure 15. THD(%) performance of conventional and multilevel inverter

The effects of different dc-link control methods on active and reactive power control in five different operating states are shown in Fig. 16. It was observed that while active power fluctuations were <10w in pi-

based closed-loop control, <15w in anfis-based control and <90w in ann control. In addition, detailed analysis results are presented in Table 4.

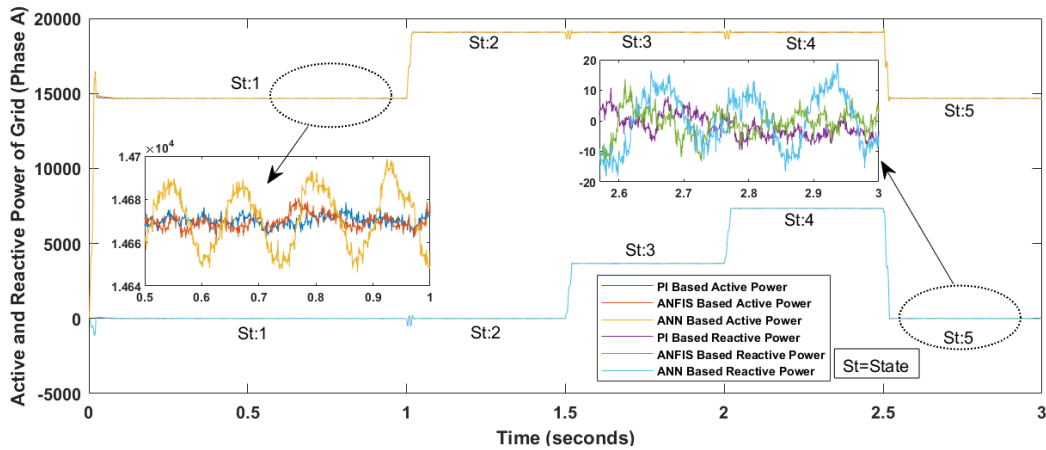


Figure 16. Active and reactive power fluctuations

PEMFC voltage, dc link voltage, power obtained from PEMFC, and duty cycle were analyzed under five different operating conditions. The data obtained by using different dc link control methods were examined. The DC link voltage is expected to be kept constant at 800 V and is used as the input voltage of the inverter. When DC link voltage control performance is compared in terms of convergence times, two closed-loop pi-based

control methods show the best performance, while ANFIS-based control method shows the worst performance. In terms of DC link voltage fluctuation, the ANFIS-based control method outperformed the ANN-based control method. DC link voltage ripple, duty cycle, PEMFC power and voltage are detailed in Fig. 17 and Table 4.

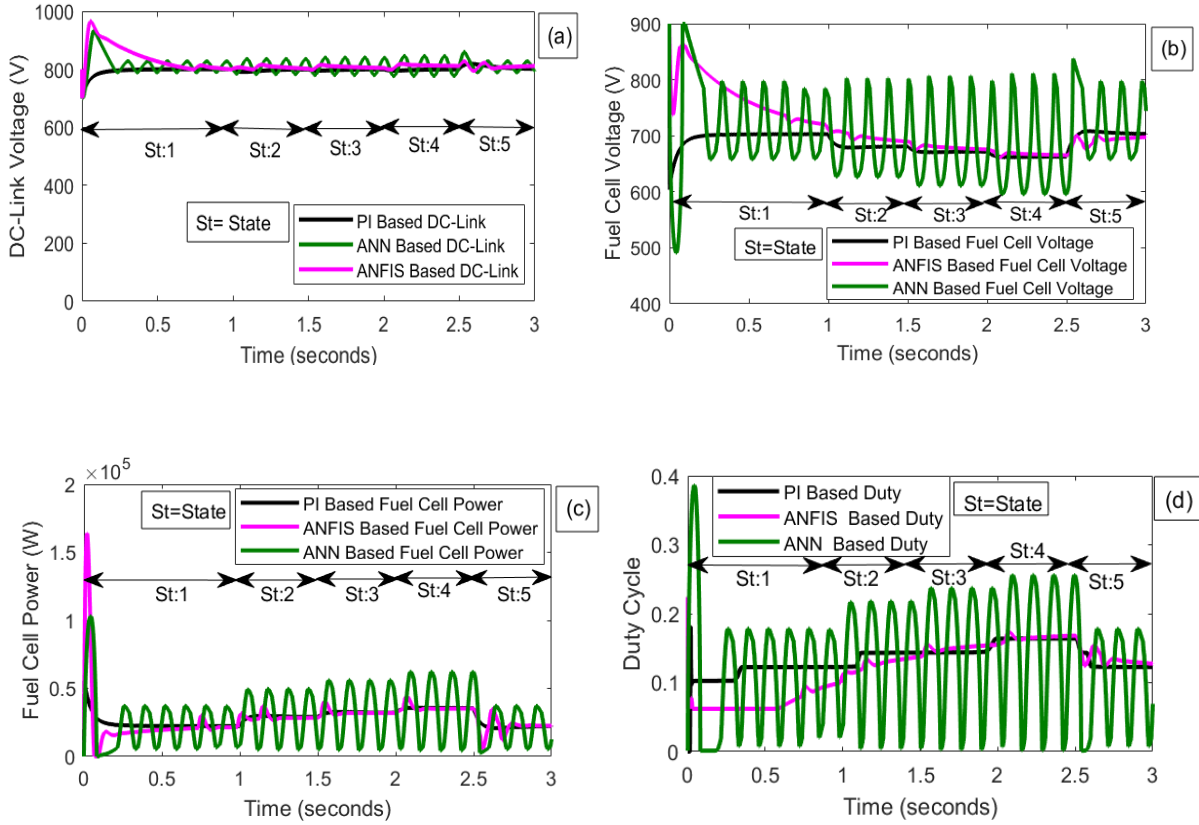


Figure 17. DC Link Voltage (a) Fuel Cell Voltage (b) Fuel Cell Power (c) Duty Cycle (d)

The effects of conventional inverter and multilevel inverter on power obtained from PEMFC under

suddenly changing temperature (65°C-70°C) and performance conditions are presented in Fig. 18.

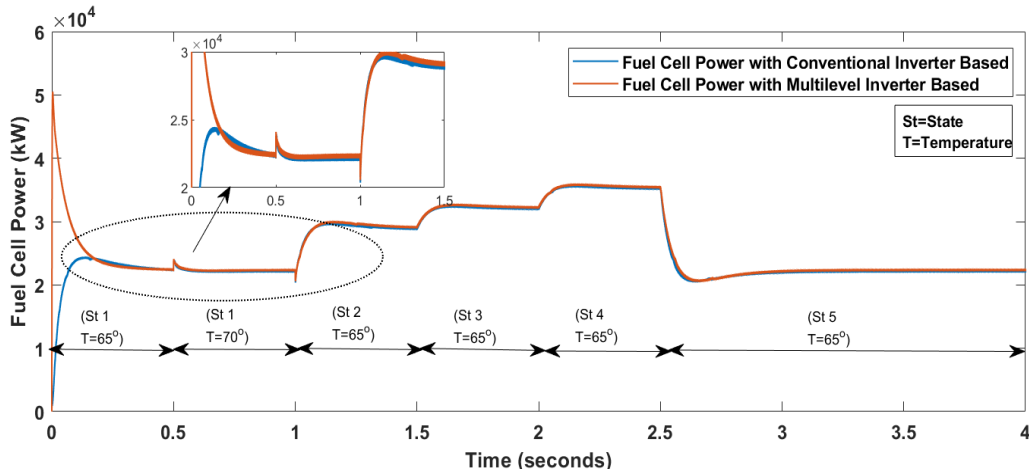


Figure 18. PEMFC power under different temperature and operational conditions

The system outputs of the proposed system and the operating conditions are presented in detail in Table

4. performances of the dc-link control methods in different

Table 4. Detailed presentation of system outputs

Operation States	DC Link Voltage Ripple (ΔV)	Power Fluctuaction (ΔP)	THD (Grid Current)	PF	Grid Power (Per Phase)	
					Active	Reactive

Two Closed Loop PI Based						
State 1	<1 V	9 W	4.73%	0.999	14.6 kW	0.003 kVAR
State 2	<1 V	9 W	3.63%	0.999	19 kW	0.002 VAR
State 3	<1 V	8 W	3.61%	0.981	19 kW	3.67 kVAR
State 4	<1 V	7 W	3.52%	0.932	19 kW	7.33 kVAR
State 5	<1 V	9 W	4.73%	0.999	14.6 kW	0.003 VAR
ANN						
State 1	27 V	50 W	4.76%	0.998	14.6 kW	0.01 kVAR
State 2	22 V	35 W	3.65%	0.999	19 kW	0.005 kVAR
State 3	26 V	60 W	3.61%	0.981	19 kW	3.68 kVAR
State 4	45 V	90 W	3.51%	0.932	19 kW	7.360 kVAR
State 5	27 V	50 W	4.76%	0.998	14.6 kW	0.01 kVAR
ANFIS						
State 1	12 V	15 W	4.83%	0.998	14.68 kW	0.005 kVAR
State 2	6 V	6 W	3.64%	0.999	19 kW	0.003 kVAR
State 3	7 V	6 W	3.61%	0.981	19 kW	3.67 kVAR
State 4	16 V	9 W	3.48%	0.932	19 kW	7.34 kVAR
State 5	12 V	15 W	4.83%	0.998	14.68kW	0.005 kVAR

Conclusion

In this study, efficient and low harmonic energy flow is tried to be provided for grid-connected PEMFC by using multi-level inverter and different dc link control methods (ANFIS, ANN, two closed loop based on pi). The multilevel inverter has outperformed conventional inverters in total harmonic distortion performance and complies with IEEE-519 standards (<5%) (Figure 15, Table 4). In addition, the effects of dc link control methods on voltage and power fluctuations and total harmonic distortion are examined and presented in Fig. 10,16,17 and Table 4. In addition, while the minimum level of active and reactive power fluctuations is obtained in the anfis-based control method, the best result is obtained in the pi-based two closed-loop control method when the average power fluctuation performance is taken into account (Table 4). Based on the convergence time, the ANN-based control method performed better than the anfis-based control method (Fig. 17). In addition, this study has shown that even if the two closed-loop dc-link control methods based on pi have more advantageous points, finding the proportional and integral gain values is an effortful process. In addition, although multilevel inverters show higher performance than conventional inverters in terms of THD (%) and power factor, it is obvious that switching losses will be higher since more switching elements are used than conventional inverters. In addition, anfis and ann-based dc link control methods can be used with more input parameters and their performance can be improved with different learning methods. It is obvious that this study is also a candidate to be an alternative application for different renewable energy sources (wind, photovoltaic and etc.), grid connections of electric vehicles (vehicle to grid technology) and different power transfer systems.

Ethics committee approval and conflict of interest statement

"There is no need to obtain permission from the ethics committee for the article prepared" "There is no conflict of interest with any person / institution in the article prepared"

Authors' Contributions

Göncü B: Study conception and design, visualization, analysis, and interpretation of data, drafting of manuscript

Yılmaz Ü: supervised the project, critical revision

Acknowledgement

This study was supported by Harran University Scientific Research Projects Unit. Project Number: 22232

References

- [1] L. Sun, Y. Jin, L. Pan, J. Shen, K. Y. Lee, "Efficiency analysis and control of a grid-connected PEM fuel cell in distributed generation," *Energy Conversion and Management*, Vol. 195, pp. 587-596, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.04.041>
- [2] M. Inci, "Active/reactive energy control scheme for grid-connected fuel cell system with local inductive loads," *Energy*, Vol. 197, 117191, pp.1-15, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117191>
- [3] U. Yilmaz, O. Turksoy, "Artificial intelligence based active and reactive power control method for single-phase grid connected hydrogen fuel

- cell systems," *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 48, no. 21, pp. 7866-7883, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.11.211>
- [4] N. Rasekh, M. Hosseinpour, "LCL filter design and robust converter side current feedback control for grid-connected Proton Exchange Membrane Fuel Cell system," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 23, pp. 13055-13067, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.02.227>.
- [5] M. S. Kandil, M. M. El-Saadawi, A. E. Hassan and K. M. Abo-Al-Ez, "A proposed reactive power controller for DG grid connected systems," *IEEE International Energy Conference*, pp. 446-451, 2010. doi: 10.1109/ENERGYCON.2010.5771722
- [6] Z. Maosong, Y. Cui, Q. Wang, J. Tao, X. Wang, H. Zhao, G. Li. "A Study on Neutral-Point Potential in Three-Level NPC Converters," *Energies*, vol. 12, no. 3367, pp. 1-22, 2019. <https://doi.org/10.3390/en12173367>
- [7] M. Kashif, M. J. Hossain, V. Sharma, S. M. Nawazish Ali and A. Khan, "Neutral-point Voltage Control of Three-level NPC Inverter for Three-phase APF based on Zero-sequence Voltage Injection," *International Conference on Electrical Engineering Research & Practice (ICEERP)*, pp. 1-5, 2019. doi: 10.1109/ICEERP49088.2019.8956988
- [8] K.Tariq, M. Karabacak, V. S. Perić, S. Z. Hassan, L. M. Fernández-Ramírez. "Novel Improved Adaptive Neuro-Fuzzy Control of Inverter and Supervisory Energy Management System of a Microgrid," *Energies*, vol.13, no. 18, pp.1-20, 2020. <https://doi.org/10.3390/en13184721>
- [9] A. H. Niasar, H. Moghbelli and A. Vahedi, "Adaptive Neuro-Fuzzy Control with Fuzzy Supervisory Learning Algorithm for Speed Regulation of 4-Switch Inverter Brushless DC Machines," *CES/IEEE 5th International Power Electronics and Motion Control Conference*, pp. 1-5, 2006. doi: 10.1109/IPEMC.2006.4778053
- [10] K. K. Gupta and S. Jain, "A Novel Multilevel Inverter Based on Switched DC Sources," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 61, no. 7, pp. 3269-3278, 2014. doi: 10.1109/TIE.2013.2282606
- [11] K.B. Hamad, D.N. Luta, A.K. Raji, "A Grid-Tied Fuel Cell Multilevel Inverter with Low Harmonic Distortions," *Energies*. vol.14, no.3 pp.1-24, 2021. <https://doi.org/10.3390/en14030688>
- [12] M.M. Savrun, M. İnci, "Adaptive neuro-fuzzy inference system combined with genetic algorithm to improve power extraction capability in fuel cell applications," *Journal of Cleaner Production*, vol. 299, 126944, pp. 1-11, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126944>
- [13] P.K. Gayen, A. Jana, "An ANFIS based improved control action for single phase utility or micro-grid connected battery energy storage system," *Journal of Cleaner Production*, Volume 164; 1034-1049, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.007>
- [14] S. Yuvaraja, M. S. A. Salam, L. Vijayaraja, R. Kesavan, R. Dhanasekar, "A novel PWM scheme for grid-tied inverter in micro-grid with enhanced power quality using silicon cells," *Materials Today: Proceedings*, Volume 46, no 9, pp.4298-4304, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.03.129>
- [15] A. Estebsari, S. Vogel, R. Melloni, M. Stevic, E. F. Bompard and A. Monti, "Frequency Control of Low Inertia Power Grids With Fuel Cell Systems in Distribution Networks," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 71530-71544, 2022. doi:10.1109/ACCESS.2022.3187099
- [16] K. B. Hamad, D. N. Luta., "PQ Open-Loop Control of a Grid-Tied Inverter Interfacing a Large-Scale Fuel Cell Stack.," *AIUE Proceedings of the 18th Industrial and Commercial Use of Energy Conference 2020*, pp 1-7., 2021, <https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3735393>
- [17] C. Subhashree, S. K. Acharya, R. K. Khadanga, S. Mohanty, J. Arshad, A. U. Rehman, M. Shafiq, J.-G. Choi, "Harmonic Profile Enhancement of Grid Connected Fuel Cell through Cascaded H-Bridge Multi-Level Inverter and Improved Squirrel Search Optimization Technique," *Energies* vol.14, no. 23, pp.1-21 2021. <https://doi.org/10.3390/en14237947>
- [18] W. Wang, B. Liu, Y. Hu, Z. Li, H. Wang, Y. Chen, S. Song, "Power Decoupling Control for Single-Phase Grid-Tied PEMFC Systems With Virtual-Vector-Based MPC," in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 55132-55143, 2021. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3071776
- [19] M. R. Mahmud and H. R. Pota, "Robust Nonlinear Controller Design for DC-AC Converter in Grid-Connected Fuel Cell System," in *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Industrial Electronics*, vol. 3, no. 2, pp. 342-351, 2022, doi: 10.1109/JESTIE.2021.3088394
- [20] S. T. Meraj, N. Z. Yahaya, K. Hasan, M.S. H. Lipu, R.M. Elavarasan, A. Hussain, M.A. Hannan, K. M. Muttaqi, "A filter less improved control scheme for active/reactive energy management in fuel cell integrated grid system with harmonic reduction ability," *Applied Energy*,

- vol. 312, 118784, 2022.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.118784>
- [21] M. Priya, P. Ponnambalam, "Three-phase Grid Connected Modular-Multilevel Converter Fed by Proton Exchange Membrane Fuel Cell" *International Journal Of Renewable Energy Research*, vol. 12, no.1, pp. 466-478 2022 <https://doi.org/10.20508/ijrer.v12i1.12802.g8420>
- [22] F. Vitale, N. Rispoli, M. Sorrentino, M.A. Rosen, C. Pianese, "On the use of dynamic programming for optimal energy management of grid-connected reversible solid oxide cell-based renewable microgrids," *Energy*, vol. 225, 120304, pp. 1-12, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120304>
- [23] H. Li, B. Sun, J. Hao, J. Zhao, J. Li, A. Khakichi, "Economical planning of fuel cell vehicle-to-grid integrated green buildings with a new hybrid optimization algorithm," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 47, no. 13, pp. 8514-8531, 2022.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.12.156>.
- [24] J. Jiang, R. Zhou, H. Xu, H. Wang, P. Wu, Z. Wang, J. Li, "Optimal sizing, operation strategy and case study of a grid-connected solid oxide fuel cell microgrid," *Applied Energy*, vol. 307, 2022, 118214, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.118214>.
- [25] M. Inci, "A flexible perturb & observe MPPT method to prevent surplus energy for grid-failure conditions of fuel cells," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 46, no. 79, pp. 39483-39498, 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.09.185>
- [26] S.A. Saadat, S.M. Ghamari, H. Mollae, F. Khavari, "Adaptive neuro-fuzzy inference systems (ANFIS) controller design on single-phase full-bridge inverter with a cascade fractional-order PID voltage controller," *IET Power Electron.*, vol.14, pp.1960–1972 2021. <https://doi.org/10.1049/pel2.12162>
- [27] S. V. S. R. Pavankumar, S. Krishnaveni, Y. B. Venugopal and Y. S. K. Babu, "A Neuro-fuzzy Based Speed Control of Separately Excited DC Motor," *2010 International Conference on Computational Intelligence and Communication Networks*, Bhopal, India, pp. 93-98, 2010. doi: 10.1109/CICN.2010.132
- [28] Lv, C., Xing, Y., Zhang, J., Na, X., Li, Y., Liu, T., Cao, D., & Wang, F. "Levenberg–Marquardt Backpropagation Training of Multilayer Neural Networks for State Estimation of a Safety-Critical Cyber-Physical System," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 14, no. 8, pp. 3436-3446, 2018. doi: 10.1109/TII.2017.2777460
- [29] O. Rabiaa, B. H. Mouna, S. Lassaad, F. Aymen and A. Aicha, "Cascade Control Loop of DC-DC Boost Converter Using PI Controller," *2018 International Symposium on Advanced Electrical and Communication Technologies (ISAECT)*, pp. 1-5, 2018, doi: 10.1109/ISAECT.2018.8618859
- [30] M. Kashif, M. J. Hossain, V. Sharma, S. M. Nawazish Ali and A. Khan, "Neutral-point Voltage Control of Three-level NPC Inverter for Three-phase APF based on Zero-sequence Voltage Injection," *International Conference on Electrical Engineering Research & Practice (ICEERP)*, pp. 1-5, 2019, doi: 10.1109/ICEERP49088.2019.8956988
- [31] O. Turksoy, U. Yilmaz, Ahmet Teke, "Efficient AC-DC power factor corrected boost converter design for battery charger in electric vehicles," *Energy*, vol. 221, 119765, pp.1-18, 2021 <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.119765>
- [32] U. Yilmaz, A. Kircay and S. Borekci, "PV system flyback converter controlled PI control to charge battery under variable temperature and irradiance," *Electronics*, Palanga, Lithuania, pp. 1-6, 2017. doi: 10.1109/ELECTRONICS.2017.7995223
- [33] P. Jin-Hyuk, K.-B. Lee, "Performance Improvement for Reduction of Resonance in a Grid-Connected Inverter System Using an Improved DPWM Method" *Energies*, vol. 11, no. 113, pp.1-16, 2018. <https://doi.org/10.3390/en11010113>
- [34] M. Milosevic, "Decoupling Control of d and q Current Components in Three-Phase Voltage Source Inverter," pp. 1-11
<https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.545.8150&rep=rep1&type=pdf>
- [35] B. Ren, X. Sun, S. An, X. Cao, Q. Zhang, "Analysis and design of an LCL filter for the three-level grid-connected inverter," *Proceedings of The 7th International Power Electronics and Motion Control Conference*, pp. 2023-2027, 2012. doi: 10.1109/IPEMC.2012.6259152



Sonlu Elemanlar Yöntemi ve Taguchi Metodu Kullanılarak Bir Kara Aracının Parametrik Olarak Optimum Tasarımının Geliştirilmesi

Developing Parametrically Optimum Design of a Land Vehicle Using the Taguchi Method and Finite Element Method

Osman Bahadır Özden^{1*}, Barış Gökçe²

¹ Necmettin Erbakan Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, bozden@mpg.com.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1231-2936>

² Necmettin Erbakan Üniversitesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, bgokce@erbakan.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6141-7625>

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 12 Kasım 2022
Revizyon 30 Nisan 2023
Kabul 17 Mayıs 2023
Online 20 Haziran 2023

Anahtar Kelimeler:

Parametrik Tasarım,
Sonlu Elemanlar Analizi,
Visual Basic,
von-Misses Gerilmesi.

ÖZ

Kara araçları fonksiyonel ihtiyaçların karşılanabilmesi ve üretim sonrası kullanım durumunda yapısal olarak emniyetli çalışması için tasarlanan araçlardır. Arazi şartları için uygulanan tasarım aracın hareket sınırlarını değiştirebilmektedir. Yapının güvenli çalışması için yapısal emniyeti sağlamak amacıyla sonlu elemanlar analizi (SEA) sonuçlarına göre tasarımlar gerçekleştirilip iyileştirilebilmektedir. Sınır değerleri ve yapısal güvenliği sağlamayan araçlar veya makineler can kaybına sebep olabilmektedir. Seri üretim için makine tasarımlarında kullanıcı isteğine göre farklı ve hızlı tasarımlar elde edilmesi üretici firmalar tarafından istenilebilmektedir. Bilgisayar destekli tasarım programlarının, programlama dilleri ile haberleştirilip arayüzler hazırlanarak hızlı ve farklı tasarımlar elde edilebilmekte ayrıca tasarım için uygulanan mühendislik maliyetini azaltabilmektedir. Belirlenen parametrelere göre hazırlanan bu arayüzler ile parametrik olarak fonksiyonel amaçları karşılayan tasarımlar gerçekleştirilebilmektedir. Bu çalışmada insan veya yük taşımak için tasarlanan bir kara aracının, arazi açıları, birden çok kişilik kullanımı ve farklı fonksiyonel ihtiyaçları için şasinin uzunluğu, yüksekliği ve genişliği ana değişkenler olmak üzere 17 adet değişken parametrik tasarım arayüzünde tanımlanmıştır. Aracın önden çarpma, yanıl çarpma ve şasinin burulması konfigürasyonları için SEA gerçekleştirilmiştir. Bu konfigürasyonlara göre 9 adet farklı tasarım için Taguchi metodu ile optimum tasarım parametreleri belirlenmiştir. Optimum tasarıma göre önden çarpma konfigürasyonu için 44.7 MPa, yanıl çarpma durumu için 25.62 MPa ve burulma konfigürasyonu için 33.66 MPa Von-Misses eşdeğer gerilme değerleri elde edilmiştir. Hareket sınırları için tirmanabilme açısı 25°, yanıl devrilme açısı 34° ve ivme sınırı 14 m/s² olarak belirlenmiştir. Aracın genel yapı itibarıyla emniyetli olduğu belirlenmiş ve optimum tasarıma göre aracın üretimi gerçekleştirilmiştir.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 12 November 2022
Received in revised form 30 April 2023
Accepted 17 May 2023
Available online 20 June 2023

Keywords:

Parametric Design,
Finite Element Analysis,
Visual Basic,
von-Misses Stress.

Doi: 10.24012/dumf.1203178

* Sorumlu Yazar

ABSTRACT

Land vehicles are vehicles designed to meet functional needs and to operate structurally safely in post-production use. The design applied for the terrain conditions can change the movement limits of the vehicle. In order to provide structural safety for the safe operation of the structure, designs can be realized and improved according to the results of finite element analysis (FEM). Vehicles or machines that do not provide limit values and structural safety can cause loss of life. In machine designs for mass production, it may be desired by the manufacturer companies to obtain different and fast designs according to the user's request. By communicating computer-aided design programs with programming languages and preparing interfaces, fast and different designs can be obtained, and it can also reduce the engineering cost applied for the design. With these interfaces, which are prepared according to the determined parameters, designs that meet functional purposes parametrically can be realized. In this study, 17 variables, including the length, height and width of the chassis, are defined in the parametric design interface for the terrain angles, multi-person use and different functional needs of a land vehicle designed for disabled people. FEM analyzes were performed for the vehicle's frontal impact, lateral impact and chassis torsion configurations. According to these configurations, optimum design parameters were determined for 9 different designs with the Taguchi method. According to the optimum design, von-Misses equivalent stress values of 44.7 MPa for the frontal impact configuration, 25.62 MPa for the lateral impact and 33.66 MPa for the torsion configuration were obtained. For the movement limits, the climbing angle was determined as 25°, the lateral tipping angle was 34° and the acceleration limit was determined as 14 m/s². It was determined that the vehicle was safe in terms of its general structure and the vehicle was produced according to the optimum design.

Giriş

Kara araçları gibi fonksiyonel amaçları karşılayabilmek için üretilen makinelerde ihtiyaçlara göre tasarım değişikliği ve çeşitliliği artış gösterebilmektedir. Tasarım değişikliklerinin fazla olması zaman kaybına ve mühendislik maliyetinin artmasına sebep olmaktadır. Günümüzde bazı ürünlerin parametrik tasarım uygulamaları sayesinde tasarımlar hızlı elde edilebilmekte ve maliyet azaltılabilmektedir [1]. Ayrıca tasarımların parametrik şekilde uygulanması tasarımların stabil bir şekilde çıkmasından dolayı verimliliğinde artış göstermektedir [2]. Bu sebeple müşteri talepleri veya başka ihtiyaçlardan dolayı tasarım değişikliklerinin fazla olması parametrik tasarım uygulamalarının geliştirilmesinde önem kazanmaktadır.

Bilgisayar destekli tasarım (CAD) programlarında bir ürün tasarlanırken uygulanan komutlar arka planında kodlar vasıtasıyla çalışmaktadır. Solidworks, Catia gibi CAD programlarında parametrik tasarım uygulamaları geliştirilebilmektedir [3, 4]. Vb.NET, VBA, C++ programlama dilleri ile program uygulama arayüzü (API) kodları kullanılarak parametrik tasarım uygulamaları geliştirilebilmektedir. Geliştirilen uygulama ile montajı oluşturan tüm parçalar arasında bilgi tabanlı ilişkiler kurulabilmekte ayrıca tasarlanan ürünün üretim maliyeti, teknik resimleri, ağırlıkları gibi ihtiyaç olan özellikler tasarım çıktısı olarak değerlendirilebilmektedir [5, 6]. Biyomekanik, hava araçları, otomotiv sektörü, robotik, mobilya sektörleri gibi CAD tasarımının kullanıldığı her alanda bu tür uygulamalar geliştirilebilmektedir [7-11]. Ayrıca satış pazarlama elemanı gibi tasarım ve CAD programı bilgisi olmayan fakat hızlı tasarım sonuçları isteyen kişilerinde kullanabileceği arayüz hazırlanarak avantajlı hale getirilebilmektedir. Literatürde farklı alanlardaki parametrik tasarım uygulamalarının ihtiyaçların ve uygulamaların artmasıyla beraber bu alanda yapılan çalışmalar önem kazanmaktadır.

Ansys gibi sonlu elemanlar analizi (SEA) gerçekleştiren bilgisayar destekli mühendislik programları tasarlanan ürünün yapısal açıdan emniyetli olup olmadığını değerlendirme aracı olarak kullanılmaktadır [12-18]. Parametrik tasarım uygulamaları ile SEA tasarım girdileri için pratik süreçler sağlanabilmektedir. Tasarlanan ürünün her parçasına gelen gerilmeyi tespit ederek yapısal bütünlüğünü incelemek amacıyla yapılan analizlerin tasarım süreci için parametrik tasarım uygulamaları süreç açısından olumlu katkılar sağlamaktadır [19, 20].

Deneyel tasarım yöntemleri girdilere göre istenilen optimum çıktı sonucunun minimum maliyet ile gerçekleşmesini sağlayan yöntemlerdendir. Taguchi metodu ise deney sayılarının az olmasıyla verimli olarak kullanılan deney tasarım yöntemlerinden birisidir [21-23]. Girdi parametrelerine göre farklı ortogonal diziler ile Taguchi metodu ile analizler gerçekleştirilip optimum çıktılar elde edilebilmektedir [24, 25]. Taguchi ortogonal dizisi L9 ortogonal dizi (OA) en verimli yöntemlerden birisidir ve az sayıda deneylerle etkili olarak kullanılabilir [26]. L9 ortogonal dizisinde 9 adet satır bulunmaktadır ve bu satırların her biri deneyi temsil etmektedir. Taguchi metodunda sinyal

gürültüsü (S/N) olarak adlandırılan istatistiksel bir değerlendirme yaklaşımı kullanılır. S/N oranı ortalamanın (sinyal), standart sapmaya (gürültü) oranı olarak tanımlanmaktadır [27]. Yapılan deneylerin S/N oranına göre değerlendirmeleri yapılarak optimum sonuçlar elde edilmesi sağlanmaktadır [28].

Kara araçlarında yapısal emniyeti sağlamakla beraber arazi şartlarına göre farklı düzlemlere göre devrilme sınır açıları araç emniyeti için önemlidir [29]. Tasarım gerçekleştirilirken aracın uzunluk, genişlik ve yükseklikleri ön ve yan düzlemlere göre devrilme sınır açısı, aracın hareket edebilmesi için ivme sınırı gibi parametreler göz önün alınarak değerlendirmeler yapılması gerekmektedir.

Parametrik tasarım uygulamalarının birçok tasarım senaryosu oluşturması ile beraber SEA gerçekleştirilip sonuçlarına göre değerlendirmeler yapılabilmektedir [30]. Her tasarım senaryosunda yapılarda farklı eşdeğer gerilmeler oluşmaktadır. Bu eşdeğer gerilmelere göre optimum tasarım elde etmek amacıyla Taguchi metodu kullanılabilir. Taguchi metodunun kullanılması belirli parametrelere göre hazırlanan tasarımlar için SEA sonuçlarına göre en uygun parametre optimizasyonu gerçekleştirilmektedir.

Bu çalışmada insan veya yük taşımak için tasarlanan bir kara aracının birçok tasarım değişikliği ihtiyacından dolayı Solidworks ve Vb.NET programlama dilinin haberleştirilmesiyle parametrik tasarım uygulaması ve arayüzü geliştirilmiştir. Aracın her parçasının birbiriyle ilişkisini de içeren bu algoritma ile aracın tüm montaj ve parçalarının tasarımını yazılım arayüzündeki parametrelere göre otomatik oluşturmaktadır. Geliştirilen bu uygulamada aracın uzunluk, genişlik ve yüksekliği SEA ve arazi şartlarına göre sınır açıları değerlendirmeleri için ana parametre olarak tanımlanıp, tasarım değişikliği ihtiyacına binaen diğer parametrelerle beraber 17 adet parametre tanımlanmıştır. Taguchi L9 ortogonal dizisi için 3 ana parametreye göre 9 adet tasarım senaryosu parametrik tasarım uygulaması ile oluşturulmuştur. 9 adet tasarıma göre önden çarpma, yandan çarpma ve burulma analiz konfigürasyonlarına SEA gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçlarına göre Taguchi deneyleri gerçekleştirilip 3 adet ana parametreye göre optimum tasarım elde edilmiştir. Optimum tasarıma göre arazi şartlarına göre devrilme sınır açıları ve ivme sınır değeri için geliştirilen yazılım arayüzü ile değerlendirmeler yapılmıştır. Bu çalışmalar sonucunda önerilen bu değerlendirme yaklaşımı ile optimum tasarıma göre aracın üretimi gerçekleştirilmiştir [31].

Materyal ve Metot

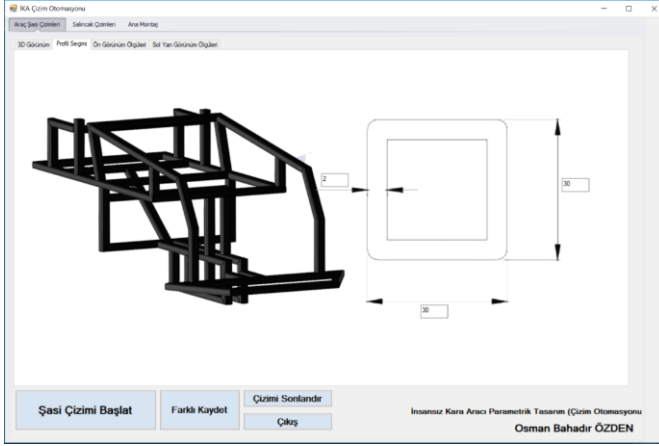
Aracın SEA analizleri Ansys yazılımında gerçekleştirilmiş olup araç üzerinde belirlenen parametrelere göre 9 adet tasarım ile analiz sonuçları değerlendirilmiştir. Analiz sonuçlarına göre optimum tasarım L9 ortogonal dizi ile Taguchi metodu ile belirlenmiştir.

Parametrik Tasarım Uygulaması

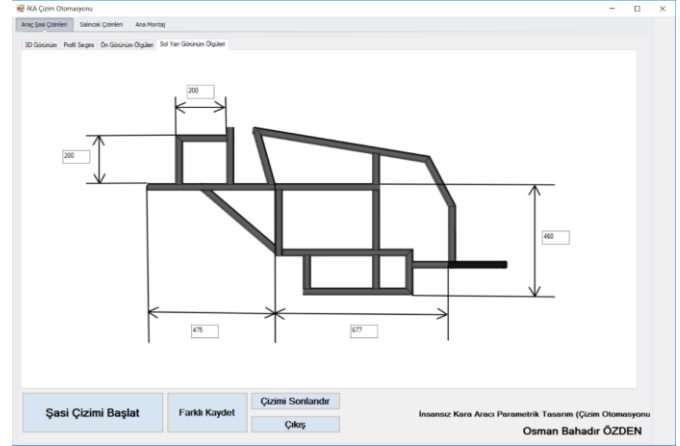
İnsan veya yük taşıma aracı olarak tasarlanan araçta parametrik tasarım uygulaması için Vb.NET programlama dili ile Solidworks CAD programı haberleştirilerek algoritmalar geliştirilmiştir. Şekil 1'de gösterildiği gibi

arayüzde aracın uzunluğu, genişliği ve yüksekliği ana değişken parametre olmak üzere toplamda 17 adet değişken tanımlanmıştır. Ana parametreler dışında tanımlanan parametreler müşterilerin talebi veya farklı ihtiyaçlara göre tasarım değişiklikleri için tanımlanmıştır. Algoritmaların komutları Solidworks programı içinde kullanılmakta olup

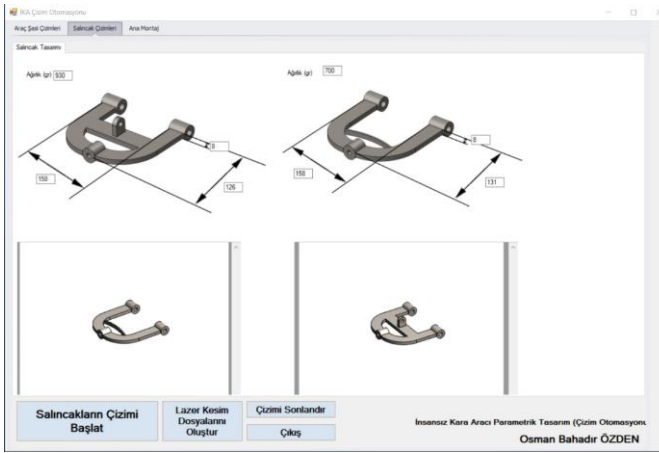
arka planda çalıştırılıp sadece hazırlanan bu program üzerinden çalıştırılabilmektedir. Bu değişkenler arayüz sekmelerinden geçişler ile ulaşılarak CAD veya tasarım bilgisi olmayan kişiler tarafından otomatik tasarlanıp üretime hazır hale getirilebilmektedir.



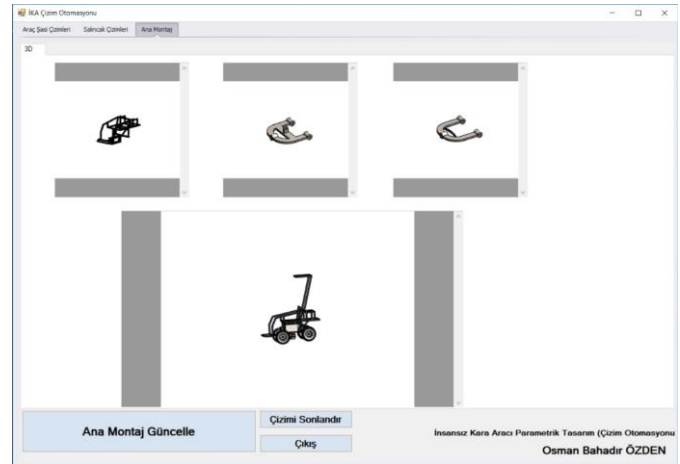
(a)



(b)



(c)



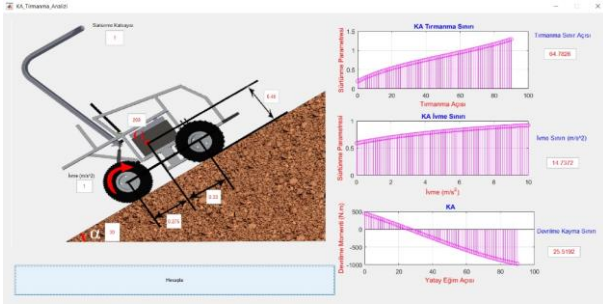
(d)

Şekil 1. Bir (a) ve (b) Aracın Şasi Parametreleri (c) Salıncak Sisteminin Parametreleri (d) Oluşturulan Tasarımın 3D Çıktısı

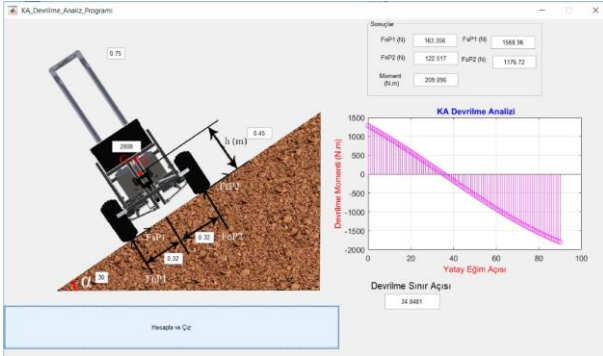
Parametrik uygulaması oluşturulurken aracın tüm parçalarının ve montajlarının bir sistem oluşturularak düzenli tasarım çıktıları sağlanmıştır. Uygulamada tüm parçalar açılıp unsur ve bağlı olduğu tüm ölçüler arayüzde girilen parametreye göre güncellenmektedir. Parçaların tasarımı tamamlandıktan sonra ana montajı oluşturan alt montajlar güncellenmektedir. Tüm parçaları ve alt montajları oluşturan unsur ve ölçüler güncellendikten sonra aracın ana montajı güncellenmektedir. Tasarım tamamlandıktan sonra genel yapıyı incelemek amacıyla 3D görünümleri oluşturulan program arayüzüne aktarılmaktadır. Böylelikle CAD programının açılmadan arka planda çalışması sağlanmıştır. Satış pazarlama görevlisi gibi CAD veya tasarım bilgisi olmayan kişilerinde kullanabileceği bu uygulama arayüzü ile müşteri veya farklı ihtiyaçlardan dolayı tasarım değişikliği istenilmesi durumunda hızlı çözümler alınabilmektedir. Parametrik tasarım yapılırken oluşturulan genel sistematik

düzen ve oluşturulan algoritmalar ile hatasız tasarım çıktıları elde edilmiştir.

Oluşturulan bu algoritmalar ile gerçekleştirilen tasarımlar aynı zamanda üretim hatasını azaltmaktadır. Parametrik tasarım yazılımları için farklı algoritmalar veya sistemler oluşturulabilmektedir. Tasarım ihtiyacındaki parametreler belirlenerek sistematik bir akış düzeni oluşturulmaktadır. Bu araç için her parçanın unsur, geometrik ölçüler ve montaj tasarımları yazılım kontrol ederek nihai tasarım oluşturmaktadır. Bu çalışma da diğer literatür çalışmalarından bağımsız olarak Şekil 2'de gösterilen sistematik akış düzeni oluşturulmuştur.



(a)

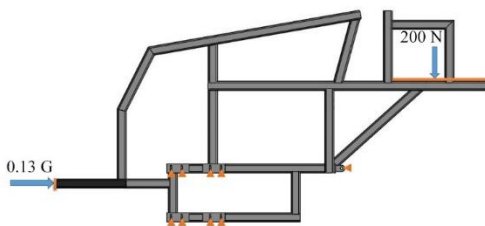


(b)

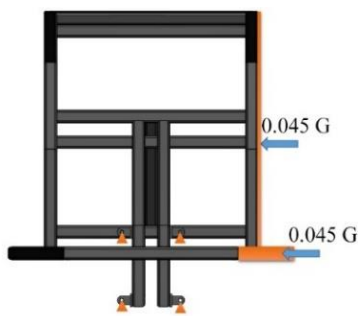
Şekil 5. Hareket sınırları hesaplamaları için oluşturulan arayüzler (a) sol yan görünümüne göre (b) ön görünümüne göre

SEA Modellemeleri

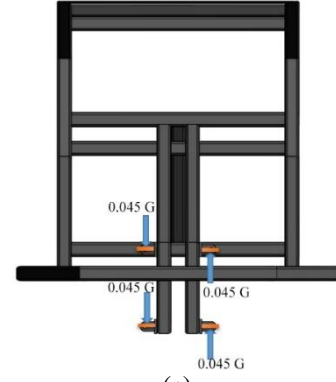
Aracın SEA modelleri için 3 farklı konfigürasyon kullanılmıştır. Bu konfigürasyonlara göre analizler gerçekleştirilmiş ve yapıda oluşan eşdeğer gerilmeler von-Mises gerilmesine göre incelenmiştir. Aracın zorlanma durumuna göre oluşturulan bu konfigürasyonların yükleme ve sınır şartları Şekil 6'da (a) önden darbe durumu için, (b) yandan darbe durumu için, (c) burulma durumu için belirtilmektedir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 6. SEA yükleme ve sınır şartları (a) önden darbe durumu (b) yandan darbe durumu (c) burulma durumu

Araçta AISI 1020 malzemesi tercihi yapılmış olup bu malzemeye göre çalışmalar gerçekleştirilmiştir. SEA çalışmalarında kullanılan AISI 1020 malzemesinin mekanik özellikleri Tablo 1'de belirtilmekte olup analizde doğrusal (linear) malzeme tanımlaması yapılarak elastik bölgedeki davranışlar incelenmiştir.

Tablo 1. AISI 1020 mekanik özellikleri [32].

Özellik	Değeri
Yoğunluk [g/cm ³]	7.9
Çekme Dayanımı [MPa]	420.507
Akma Dayanımı [MPa]	351.571
Elastikiyet Modülü [GPa]	200
Kesme Modülü [GPa]	77
Poisson Oranı	0,29
Termal İletkenlik [K]	1.5 e-005

Araştırma Sonuçları ve Tartışma

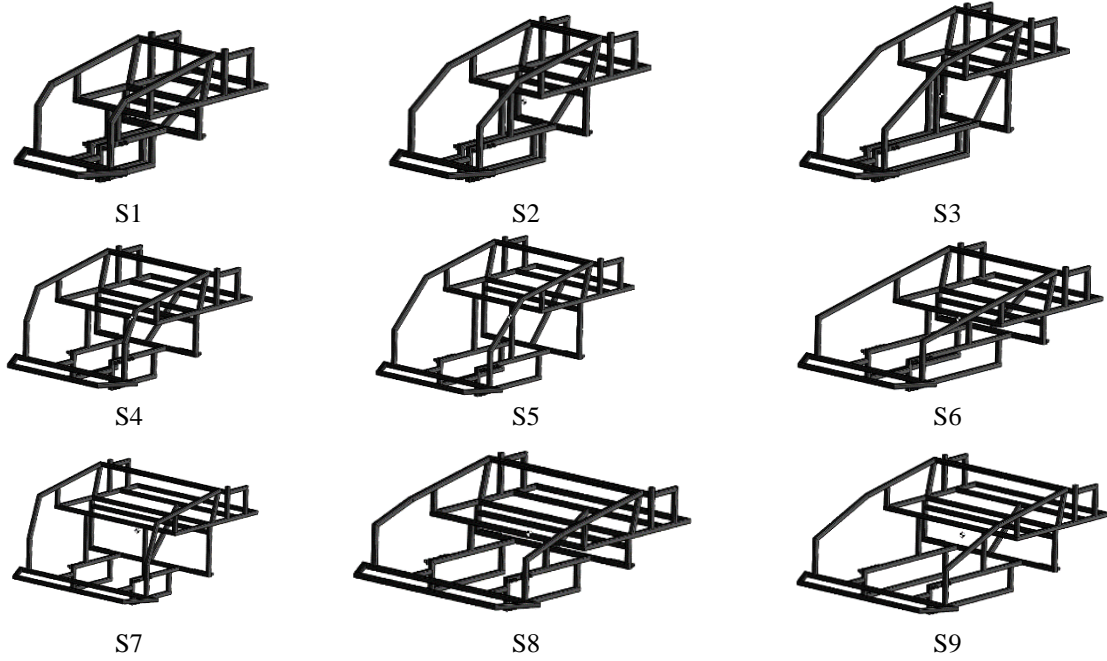
Aracın yapısal olarak değerlendirilebilmesi için SEA gerçekleştirilmiştir. Araç için genişlik, uzunluk ve yükseklik parametrelerine göre parametrik tasarım uygulaması kullanılarak 9 adet otomatik tasarım oluşturulmuştur. Aracın 2 kişilik kullanımı, farklı arazi şartları için ihtiyaçlara göre parametreler belirlenmiş ve bu ihtiyaçlara göre tasarımlar oluşturulmuştur. 9 adet tasarımın SEA gerçekleştirilerek eşdeğer gerilme değerleri bulunmuştur. Tablo 2'de parametrik tasarım uygulaması ile oluşturulan tasarımların numerik değerleri belirtilmektedir.

Tablo 2. Parametrik tasarım uygulaması ile oluşturulan tasarım.

Seri No.	Genişlik [mm]	Uzunluk [mm]	Yükseklik [mm]	Kütle [kg]
1	450	680	360	25.4162
2	450	880	460	28.2121
3	450	1080	560	31.039
4	770	680	460	31.7028
5	770	880	560	34.4609
6	770	1080	360	34.5369
7	1070	680	560	37.7461
8	1070	880	360	37.5199
9	1070	1080	460	40.3218

Tablo 2’de belirtilen parametreler parametrik tasarım uygulamasında girilerek tasarım otomasyonu gerçekleştirilmiştir. Pratik tasarımlar elde edilmesi için vb.NET programlama dili ile hazırlanan uygulama, Solidworks CAD programını arka planda çalışacak şekilde kodları hazırlanmış olup 9 adet tasarımı yaklaşık 120 saniye kısa bir süre içerisinde hazırlamıştır. Uygulama da aracı

diğer yapıları için standart ölçüler girilmiş olup şasinin optimum tasarımı için çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Diğer yapıların parametreleri müşteri talebi veya farklı ihtiyaçlar olması durumu için hazırlanmıştır. Şekil 7’de parametrik tasarım uygulaması ile elde edilen 9 adet tasarım gösterilmektedir.



Şekil 7. Parametrik tasarımlar

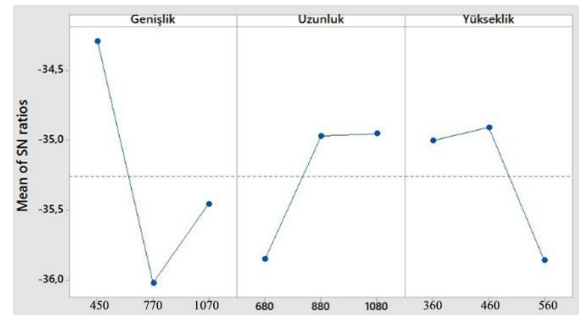
Oluşturulan 9 adet tasarım ile Şekil 6’da belirtilen aracın burulma, yandan çarpma ve önden çarpma konfigürasyonları için SEA gerçekleştirilerek yapılar üzerinde maksimum von-Mises eşdeğer gerilmesi bulunmuştur. Bu sonuçlara göre Taguchi metodu ile sinyal gürültü oranları bulunmuştur. Optimum tasarım parametrelerini belirlemek için gerçekleştirilen SEA ve Taguchi metodu ile SN oranları Tablo 3’te belirtilmektedir.

Tablo 3. Analiz ve Taguchi metodu ile S/N sonuçları

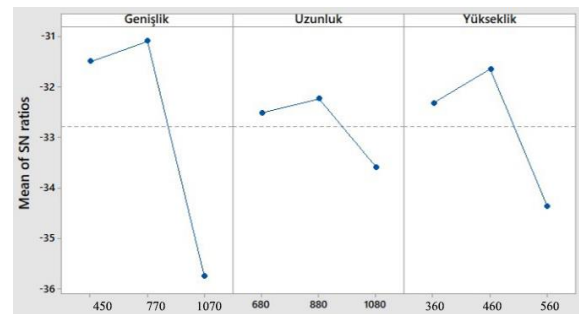
Seri No.	Ön Çarpma		Yanal Çarpma		Burulma	
	Von-Mises [MPa]	SN Oranı	Von-Mises [MPa]	SN Oranı	Von-Mises [MPa]	SN Oranı
S1	54.49	-34.72	30.3	-29.61	44.52	-32.97
S2	47.3	-33.49	32.6	-30.25	35.21	-30.93
S3	54.04	-34.65	53.9	-34.62	37.35	-31.44
S4	65.52	-36.32	33.3	-30.44	30.89	-29.79
S5	66.29	-36.42	35.4	-30.97	53.73	-34.60
S6	58.2	-35.29	39.3	-31.87	174.7	-44.84
S7	66.69	-36.48	75	-37.49	62.61	-35.93
S8	56.1	-34.97	59.5	-35.48	79.66	-38.02
S9	55.59	-34.90	51.8	-34.28	99.95	-39.99

İstatiksel hesaplamaların ve analizlerinin uygulanmasında istatistiksel analiz programı kullanılmıştır. Optimum

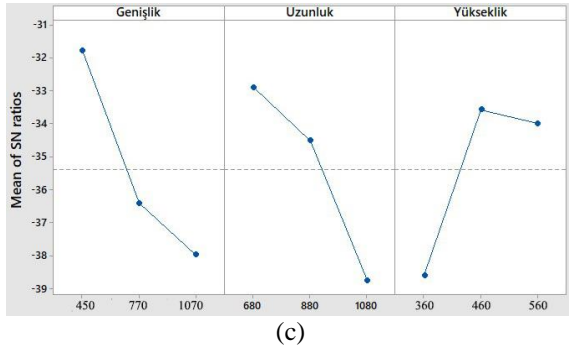
ölçülerin belirlenebilmesi için program yardımı ile sinyal gürültü oranları için grafikler çıkarılmıştır. Şekil 8’de SEA sonuçları neticesinde oluşturulan parametre seviyeleri için S/N grafikleri gösterilmektedir.



(a)

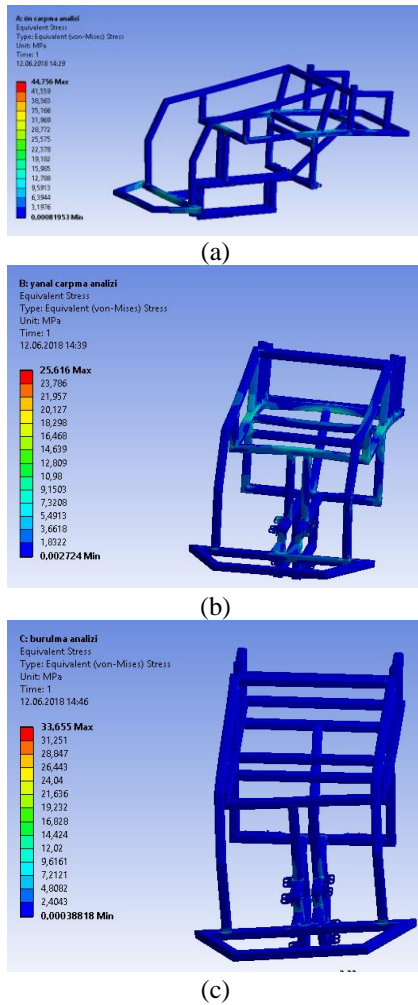


(b)



Şekil 8. SEA sonuçlarına göre parametre seviyeleri (a) Önden çarpma, (b) yanal çarpma, (c) burulma

SEA sonuçlarının Taguchi metodu ile optimum tasarım parametrelerinin belirlenmesi için yapılan çalışmaların sonucunda genişlik 450 mm, uzunluk 680 mm ve yükseklik 460 mm bulunmuştur. Optimum tasarım parametreleri ile yapılan SEA sonuçlarına göre önden çarpma durumu için 44.76 MPa, yanal çarpma durumu için 25.62 MPa, burulma durumu için ise 33.66 MPa von-Mises gerilmeleri bulunmuştur. Şekil 9'da SEA sonuçlarına ait sonuçlar gösterilmektedir.



Şekil 9. SEA sonuçları (a) Önden çarpma, (b) yanal çarpma, (c) burulma

Optimum tasarım parametreleri bulunmuş olup aracın hareket sınırları değerlerinin bulunması için hazırlanmış olan program arayüzüne girilmiştir. Aracın tırmanabilme açısı 25.52° , yanal devrilme açısı 34.85° , ivme sınırı 14.74 m/s^2 bulunmuştur. Bu değerler kabul edilebilir olarak değerlendirilip aracın üretimi gerçekleştirilmiştir. Şekil 10'da optimum parametrelerle tasarlanmış insan veya yük taşıma aracının üretimi sağlanan görünümü ve tasarımı gösterilmektedir.

Literatürde bulunan bazı çalışmalarda [6] unsur, geometrik ve montaj tabanlı parametrik tasarım yazılımları gerçekleştirilmektedir. Fakat literatürdeki bazı çalışmalarda sadece tasarım gerçekleştirilmiş olup bu çalışma da yazılım vasıtası ile tasarım gerçekleştirildikten sonra değerlendirme kriterleri eklenmiştir. Ayrıca Vb.NET programlama dili ile arayüz oluşturulmuştur. Hareket sınırlarının tespiti, eşdeğer gerilme, toplam ağırlık, optimum tasarım gibi kriterlerin uygunluğu da değerlendirilmiştir. Ayrıca bazı çalışmalarda geometri, unsur ve montaj tabanlı olarak geliştirilen algoritmalar ve sonrasında farklı kriterlere göre ihtiyaç duyulan tasarımlar elde edilebilmektedir [33, 34]. Bazı çalışmalarda [35] ise topoloji optimizasyonu gibi tasarım sadeleştirme için çalışmalar gerçekleştirilmektedir. Bu çalışma da ise parametrik tasarım sonrası Taguchi metodu ile optimum tasarım için parametrelerin değerleri tespit edilmiştir.

Sonuç

Müşterilerin veya farklı ihtiyaçlar sebebiyle makine tasarımlarında hızlı değişiklikler istenilebilmektedir. Sürenin uzaması üretim öncesi sürenin artmasına ve mühendislik maliyetinin de artışına sebep olabilmektedir. Parametrik tasarım uygulamaları ile ürüne özgü parametreler tanımlanarak bu süreç verimli hale gelmektedir. Bu çalışmada insan veya yük taşıma amacıyla tasarlanan aracın katı modeli için Vb. NET ile Solidworks CAD programı haberleştirilip 17 değişken tanımlanacak arayüz hazırlanmıştır. Bu parametrelerin optimum değerleri SEA ve Taguchi metodu kullanılarak belirlenmiş olup uzunluk, genişlik ve yükseklik ana parametrelerine göre 9 adet tasarım 120 saniye içinde oluşturulmuştur. Oluşturulan tasarımlar için aracın önden çarpma, yanal çarpma ve burulma durumları için SEA gerçekleştirilmiştir. SEA sonuçları neticesinde Taguchi metodu ile optimum ana değişken parametreleri belirlenmiştir. Optimum tasarıma göre SEA sonuçları önden çarpma için 44.76 MPa, yanal çarpma durumu için 26.62 MPa, burulma durumu için 33.66 MPa bulunmuştur. Aracın yapısal olarak emniyetli olduğu belirlenmiş ve hareket sınırları için hazırlanan program arayüzü ile tırmanma açısı 25.52° , yanal devrilme açısı 34.85° ve ivme sınırı 14.74 m/s^2 bulunmuştur. Aracın yapılan optimizasyon çalışması neticesinde genel yapı itibarıyla emniyetli olduğu belirlenmiştir.

Bu çalışma neticesinde, makinelerin üretim öncesi tasarım ve analiz süreçleri için bu yaklaşım ve uygulamalar ile gerçekleştirilen değerlendirmeler, mühendislik maliyetini azaltmak, can kaybını önlemek ve

yapısal emniyeti sağlamak için önerilmektedir. Ayrıca literatürde bulunan bazı çalışmalardan farklı olarak parametrik tasarım yazılım arayüzü ile daha pratik ve kullanışlı uygulama hazırlanmış olup geometri, unsur, parça, montaj ve birbirleri ile ilişkileri tanımlanarak oluşturulan algoritma ve uygulamalar önerilmektedir.

Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur. Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Teşekkür

Bu çalışma, Osman Bahadır Özden'in yüksek lisans çalışmasından türetilmiştir. Ayrıca desteklerinden dolayı "MPG Makina Prodüksiyon Grubu Makine İmalat San. ve Tic. A.Ş." firmasına teşekkür ve şükranlarımızı sunarız.

Kaynaklar

- [1] N. Geren, O. O. Akçalı, and M. Bayramoğlu, "Parametric design of automotive ball joint based on variable design methodology using knowledge and feature-based computer assisted 3D modelling," *Engineering applications of artificial intelligence*, vol. 66, pp. 87-103, 2017.
- [2] Y. Bodein, B. Rose, and E. Caillaud, "A roadmap for parametric CAD efficiency in the automotive industry," *Computer-Aided Design*, vol. 45, no. 10, pp. 1198-1214, 2013.
- [3] Y. Cheng, F. He, X. Lv, and W. Cai, "On the role of generating textual description for design intent communication in feature-based 3D collaborative design," *Advanced Engineering Informatics*, vol. 39, pp. 331-346, 2019.
- [4] C. H. Chu, M. C. Song, and V. C. Luo, "Computer aided parametric design for 3D tire mold production," *Computers in Industry*, vol. 57, no. 1, pp. 11-25, 2006.
- [5] T. Türkücü and H. R. Börklü, "Tersine mühendislik yaklaşımına dayalı yeni bir imalat için tasarım işlem modeli," *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, vol. 6, no. 1, pp. 91-104, 2018.
- [6] F. Demoly and S. Roth, "Knowledge-based parametric CAD models of configurable biomechanical structures using geometric skeletons," *Computers in Industry*, vol. 92, pp. 104-117, 2017.
- [7] K. Amadori, M. Tarkian, J. Ölvander, and P. Krus, "Flexible and robust CAD models for design automation," *Advanced Engineering Informatics*, vol. 26, no. 2, pp. 180-195, 2012.
- [8] S. Bhooshan, "Parametric design thinking: A case-study of practice-embedded architectural research," *Design Studies*, vol. 52, pp. 115-143, 2017.
- [9] J. Byrne, P. Cardiff, and A. Brabazon, "Evolving parametric aircraft models for design exploration and optimisation," *Neurocomputing*, vol. 142, pp. 39-47, 2014.
- [10] E. J. Reddy and V. P. Rangadu, "Development of knowledge based parametric CAD modeling system for spur gear: An approach," *Alexandria engineering journal*, vol. 57, no. 4, pp. 3139-3149, 2018.
- [11] Z. Xie, L. Yao, J. Ding, K. Ren, B. Jia, and J. Liu, "Development of parametric design system of double circular arc spiral bevel gear nutation drive based on Solidworks," *Advances in Mechanical Design: Proceedings of the 2021 International Conference on Mechanical Design (2021 ICMD)*, 2022: Springer, pp. 1471-1487.
- [12] A. Akpolat, "Analysis of contact stresses in spur gears by finite element method," *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, no. 17, pp. 539-545, 2019.
- [13] E. Emir and E. Benzer, "Structural analysis of industrial foam crusher machine by using finite element method," *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, no. 29, pp. 343-350, 2021.
- [14] A. Gök, "Design and numerical analysis of face mask polymer shield against infectious diseases," *Journal of Mechanics in Medicine and Biology*, vol. 22, no. 06, p. 2250039, 2022.
- [15] A. Gök, H. Demirci, and K. Gök, "Determination of experimental, analytical, and numerical values of tool deflection at ball end milling of inclined surfaces," *Proceedings of the institution of mechanical engineers, part e: journal of process mechanical engineering*, vol. 230, no. 2, pp. 111-119, 2016.
- [16] O. B. Özden, B. Gökçe, and A. Erdemir, "Investigation of welded joints in finite element analysis," *2nd International Congress on Scientific Advances (ICONSAD'22)*, pp. 516-522, 2022.
- [17] G. Sarı, A. F. Ak, A. A. Akış and E. Aydınoglu, "Experimental and numerical modal analysis of a bladed rotor", *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, vol. 13, no.1, pp. 57-63, 2022.
- [18] E. Esener, "Plastisite modellerinde pekleşme etkisinin sonlu elemanlar analizi ile tespiti", *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, vol. 11, no. 1, pp. 171-181, 2020.
- [19] K. Gök, A. Gök, and Y. Kisioglu, "Computer aided finite element simulation of the developed driller system for bone drilling process in orthopedic surgery," *Journal of Advanced Manufacturing Systems*, vol. 18, no. 04, pp. 583-594, 2019.
- [20] K. Gök, A. B. Selçuk, and A. Gök, "Computer-aided simulation using finite element analysis of protect against to coronavirus (COVID-19) of

- custom-made new mask design," *Transactions of the Indian Institute of Metals*, vol. 74, no. 5, pp. 1029-1033, 2021.
- [21] G. Taguchi, *System of Experimental Design: Engineering Methods to Optimize Quality and Minimize Costs* (no. 1. c.). UNIPUB/Kraus International Publications, 1987.
- [22] Y. Kayalı, B. Gökçe, E. Mertgenç, F. Çolak, and R. Kara, "Analysis with taguchi method of wear behaviors of borided AISI 52100 steels," *Journal of the Balkan Tribological Association*, 2013.
- [23] Y. Kayali, B. Gokce, E. Mertgenc, F. Colak, and R. Kara, "Analysis of wear behavior of borided AISI 52100 steel with the Taguchi method," *J Balkan Tribol Assoc*, vol. 19, no. 3, p. 365, 2013.
- [24] Ö. Şeyma, "Taguchi metodu kullanılarak plastik enjeksiyon kalıplama tekniğiyle üretilen parçadaki çekme probleminde etkili parametrelerin optimizasyonu," *Researcher*, vol. 1, no. 01, pp. 48-56, 2021.
- [25] K. Gök, A. Gök, and Y. Kisioglu, "Optimization of processing parameters of a developed new driller system for orthopedic surgery applications using Taguchi method," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 76, pp. 1437-1448, 2015.
- [26] B. Maazinejad *et al.*, "Taguchi L9 (34) orthogonal array study based on methylene blue removal by single-walled carbon nanotubes-amine: Adsorption optimization using the experimental design method, kinetics, equilibrium and thermodynamics," *Journal of Molecular Liquids*, vol. 298, p. 112001, 2020.
- [27] G. Shanmugasundar, B. Karthikeyan, P. S. Ponvell, and V. Vignesh, "Optimization of process parameters in TIG welded joints of AISI 304L-austenitic stainless steel using Taguchi's experimental design method," *Materials Today: Proceedings*, vol. 16, pp. 1188-1195, 2019.
- [28] A. Gök, C. Gologlu, and H. I. Demirci, "Determination of form defects depending on tool deflection in ball end milling of convex and concave surfaces," 2014.
- [29] H. Eric Tseng, L. Xu, and D. Hrovat, "Estimation of land vehicle roll and pitch angles," *Vehicle System Dynamics*, vol. 45, no. 5, pp. 433-443, 2007.
- [30] M. Shaqura and J. S. Shamma, "An Automated Quadcopter CAD based Design and Modeling Platform using Solidworks API and Smart Dynamic Assembly," in *ICINCO (2)*, pp. 122-131, 2017.
- [31] Özden, O. B., (2018). "Özel amaçlı elektrikli bir kara aracının tasarımı ve prototipinin geliştirilmesi," Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği A.B.D., 2018.
- [32] O. Ikechukwu, "Finite element analysis of tungsten inert gas welding temperatures on the stress profiles of ais1 1020 low carbon steel plate," *International Journal of Engineering Technologies IJET*, vol. 5, no. 2, pp. 50-58, 2019.
- [33] S. Cheresnia and S. Berman, "Automatic identification of the assembly base component for robotic manufacturing," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 55, no. 2, pp. 90-95, 2022.
- [34] J. D. Camba, M. Contero, and P. Company, "Parametric CAD modeling: An analysis of strategies for design reusability," *Computer-Aided Design*, vol. 74, pp. 18-31, 2016.
- [35] C. Dragne, C. Radu, and M. Iliescu, "Mechanical engineering of robotic systems by solidworks."



Combination of SX Steel with Copper Intermediate and GR5 (Ti6Al4V) Titanium Alloy by Diffusion Welding

Jiyan GÜNEY¹, Haluk KEJANLI^{*2}

1 Dicle University, Mechanical Department, jiyanguney21@outlook.com, Orcid No: 0000-0003-0168-6983

2 Dicle University, Mechanical Department, kejanlih@dicle.edu.tr, Orcid No: 0000-0002-4987-6316

ARTICLE INFO

Article history:

Received 22 February 2023
Received in revised form 30 April 2023
Accepted 25 May 2023
Available online 20 June 2023

Keywords:

GR5 (Ti6Al4V), SX Steel, Diffusion Welding

ABSTRACT

Diffusion welding, also known as solid state welding or pressure welding, is a type of welding process that involves bonding two metal surfaces together by applying heat and pressure, without or using any interlayer material. In this study, the effect of GR and SX materials of welding temperature on the connection is examined with the diffusion welding method using a copper intermediary layer. The material pairs are combined with a pressure of 5 MPa and a fixed welding time of 60 minutes in an argon gas environment in a silicon bar oven at the temperature of 980, 1000, and 1020°C. The SEM-EDS-AFM analysis of the combined samples is performed, the metallographic structure of the intermediary layer in the diffusion-affected region is examined by the optical microscope, and the possible phases are tried to be determined by the XRD analysis. The micro stiffness values of the connection area are analyzed.

Doi: 10.24012/dumf.1254912

* Corresponding author

Introduction

Titanium materials have a major role in industrial aviation in the commercial market because of their resistance to high strength and temperature corrosion [1] - [3]. GR5 (Ti6Al4V) materials are $\alpha+\beta$ Ti alloys, and these alloys contain between 10-50% of the β -phase at room temperature [4]. The SX 316 is a version of the SX 304 with enhanced molybdenum and a slightly higher nickel.

The resulting composition of this SX 316 gives the steel much higher corrosion resistance in many aggressive environments. Molybdenum makes the steel more resistant to cavitation and cracks corrosion in chloride-contaminated environments. A lower overall corrosion ratio in slightly abrasive environments provides the steel with a good atmospheric corrosion resistance in dirty marine atmospheres [5].

The most important alloy element to help ensure corrosion resistance in stainless steel is chromium, and it must be weighted at least 11% of the composition. In addition of nickel and molybdenum to the chemical compound, the corrosion resistance of steel is increased further [6].

The diffusion source is a process where welded parts are in close contact by heating up to a certain temperature under controlled pressure. The diffusion bond, as its name suggests, contains the internal diffusion of atoms along the interface of the solid and sometimes liquid welding, and is a local plastic deformation and maximum surface approach that allows the creation of atomic diffusion and high-strength connection between two welded parts [7] - [9].

The production of quality diffusion weldings with low plastic deformation appears to be possible by using a soft intermediate layer between inter surfaces and GR2 and GR5-rich titanium alloy materials, using the aluminum arc, constant pressure in the argon protective gas atmosphere (5 MPa), constant time (55 min) and 850, 900 and 950°C are combined with diffusion welding method in a problem-free manner [10], [11].

Titanium and alloys exhibit different characteristics if they are in the martensite alpha structure and they have a needle shape. For example, alloys with a coaxial grain structure have high sponges and strength, high styling capability,

and high resistance to tensile corrosion cracking, while alloys with needle grain construction have excellent creeping resistance and good fracture toughness [12].

Aydin, Hidiröglu, Kaya, and Kahraman have determined that the diffusion of titanium to copper and copper to titanium happens at different distances and densities. They have observed that it is caused by atomic diameters, activation energies, and cage structures [13].

Akca and Gürsel have investigated the impact and importance of the intermediate layer in diffusion welding. They have found that one of the best intermediate layer materials is copper, based on their results using different metal duos and different metal intermediate layers because copper has high thermal conductivity and the ability to transmit which allows higher heat flows [14]. Akca and Gürsel have combined aluminum with titanium alloy by using diffusion welding at a constant temperature of 560-600-640°C for 60 min and under the influence of argon gas. They have determined that hardness values increase when the welding temperature increases and titanium begins to take place in the β -phase structure [15].

AISI 304 stainless steel has been combined successfully with (86.86 SiO₂%) porous ceramic material with high silicon by diffusion welding using an intermediate layer, but there has not been enough fusion at temperatures below 850°C [16]. Atasoy has argued that the optimal intermediate material parameters should be selected to combine titanium and low-carbon steel materials with diffusion welding and have obtained the highest intermediary strength in samples combined with 90 minutes and at 850°C in the study [17].

Metal corrosion caused by acids creates a regional problem near the source of contamination. The main cause is due to dry air build-up. For metal surfaces in contact with the soil, the increase in acid in the soil is proven by data to be a factor that increases the risk of corrosion [18].

The Vickers test is usually easier to use than other hardness tests because the necessary calculations are independent of the indent size and the indentation can be used for all materials regardless of hardness. Precision cutting is used to separate samples or cut a sample into a very precise position [19], [20]. Surface roughness is one of the reasons that affect the quality of the diffusion welding. Roughness affects the time required for maximum bonding between welded surfaces. During the fusion process, especially the wave-length long rough is important. High pressure and long welding time must be applied to eliminate gaps. Because diffusion depends on temperature and time [20].

In diffusion welding studies using a cart, the regions with the highest hardness values are those close to the interlayer [22]-[26].

Increasing the temperature in interlayer diffusion welding works is positive for the formation of more intermetallic phases [27].

Material and Method

Materials

GR5 (Ti6Al4V) is a material commonly used in aerospace and space, biomedical and automobile sectors, consisting of pure titanium at a minimum of 99% purity. Besides being lightweight, GR5 is separate from similar materials with its ability to resist corrosion at high levels and show high strength. SX steel is high silicon-content austenitic stainless steel with the ability of good quality of welding and excellent corrosion resistance in high concentration sulfuric acid and nitric acid. SX is used in areas such as acid coolers, acid piping systems, acid distributors, acid towers and tanks, pumps, nozzles, internals, strainers and mesh pads. With improving technology, the need for steel-titanium materials that are resisted to acid and made with welded joint is increasing. Commercially supplied for distribution welding, GR5 and SX steel are prepared by cutting underwater on the precision cutting machine of 10x6 mm. At 99.5% purity of 30 μ m thickness, the hand-held Cu foil in Alpha Aesar is used as searchable. The chemical components of the materials are given in Table 1. The cutting stages of the samples are shown in Figure 1.

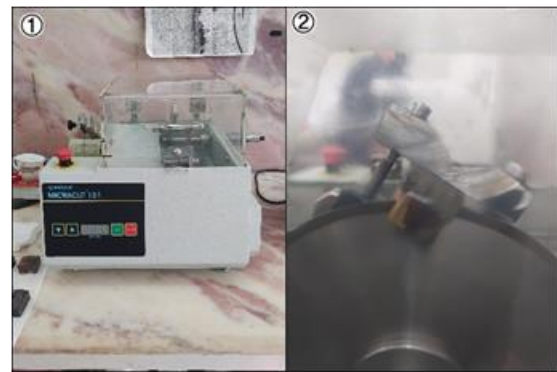


Figure 1. 1) Precision cutting machine, 2) Cutting metals.

Table 1. Chemical components of SX and GR5 materials

Element	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu
SX	55	≤0.025	5.0	0.5	≤0.045	≤0.030	17.5	19.5	0.4	2.0
Element	Ti	V	Al							
GR5	93.32	3.5-4.20	2.68							

Table 2. Mechanical properties of materials.

	SX	GR5	Cu
Density (g/cm ³)	7,9	4,51	8,96
Melting Point (°C)	1540	1660	1085
Modulus of Elasticity (MPa)	200	110	120
Thermal Conductivity(W/m°C)	11	21,9	413

AFM Analysis

The surfaces of the materials to be combined with the diffusion welding are polished with 180-240-360-400-600-800 and 1000 mesh water based sanding and then the surfaces are made to be ready for surface topography application with the AFM (Atomic Force Microscope) device. Surface analysis and surface roughness measurement with AFM have been applied to all three material surfaces. The wavelength difference of roughness on the surface of all three materials has been noticeably

observed with AFM analysis. When the wavelength of the SX and copper is examined, a homogeneous surface image is obtained. However, when looking at the wavelength of titanium surface roughness, it has been observed that a more heterogeneous surface formed than the other two materials (Figure 2, 3, 4). The reason is thought to result from the fact that surface roughness, arithmetic average deviation (RA), quadratic average roughness, and the value of Rq (RMS) on GR5 are higher than the other two material types (Table 3).

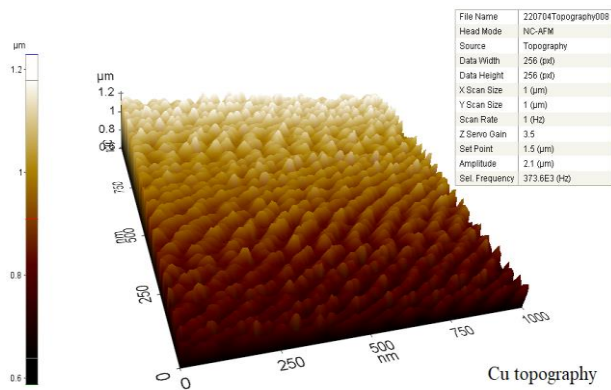


Figure 2. AFM images of GR5 materials topography.

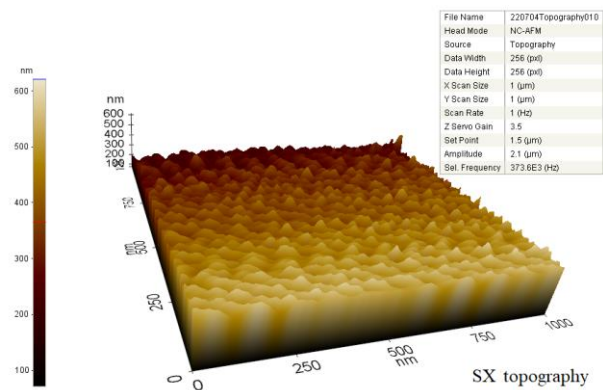


Figure 3. AFM images of SX materials topography.

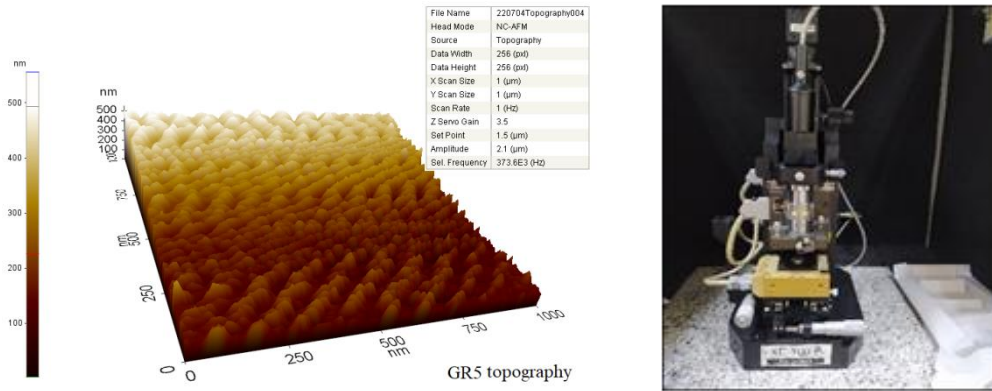


Figure 4. AFM images of GR5 materials and Atomic Force Microscope.

Table 3. Surface roughness values (µm).

Materials	R _a	R _q
Cu	0.0039	0.0046
SX	26.854	33.782
GR5	53.168	60.940

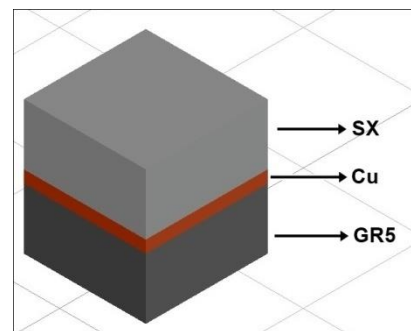


Figure 6. Schematic view of samples prepared for diffusion welding.

Diffusion Welding

Three groups (M1, M2, and M3) for experiments and three samples for each group are prepared and the average of the applied test results is calculated. The samples are welded with specially prepared equipment for diffusion welding, sending argon gas with a purity of 99.9% to the high-temperature oven at a 3 lt/min flow rate (Figure 5).



Figure 5. Diffusion welding furnace.

Test samples are welded at temperatures 980, 1000, and 1020°C in 60 minutes at 5MPa constant pressures. The welding parameters applied to the samples are given in Table 4.

Table 4. Diffusion Welding Parameters

Parameters	M 1	M 2	M 3
Pressure(MPa)	5	5	5
Temperature(°C)	980	1000	1020
Time (min.)	60	60	60

Microstructure Analysis

Samples combined with diffusion welding are cut perpendicular to the intermediate surface with a precision cutting device with a diamond disc for microhardness measurement (Figure 6). The surfaces are then sanded with 400- 600-800-1000-1200 and 2000 grit respectively, then polished with 9, 6, and 3µm diamond paste, and dried with dry air (ultrasonic) by applying the alcohol and high-

frequency sound waves to a liquid-filled tank. Samples prepared for analysis with the optical microscope (Nikon Epiphot 200 Inverted) are etched in solution 6ml HF, 9ml HNO₃, and 85ml H₂O (King water) and dried with hot dry air after they are washed with distilled water and cleaned with alcohol.

Microhardness Measurements

The microhardness values of the samples are measured in the AOB Vickers hardness device (Figure 7). Hardness measurement is carried out by applying the 50 grams load for 10 seconds. Average microhardness values are taken after approximately 9 different points and 3 measurements from each point at approximately 10 μ m intervals are carried out (Figure 8).



Figure 7. Vickers microhardness measuring machine [21].

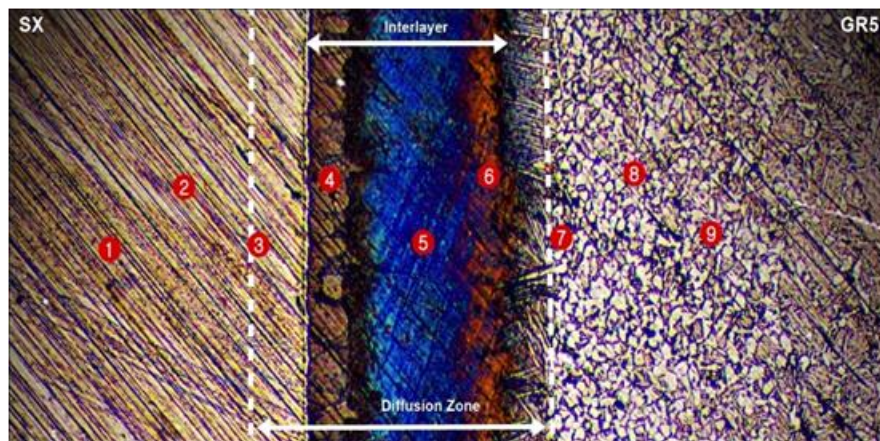


Figure 8. Microhardness measurement points.

Results and Discussion

Microstructure Results

The samples are successfully combined with the diffusion welding method using Cu intermediate layer. When the microstructure images of the test samples are examined, dense diffusion zones are observed in M3 samples at 5 MPa pressure, 1020°C, and 60 minutes of standby time. The intermediate layer does not create contrast, the microstructures on both sides of the intermediate layer are the opposite of each other. In the sample shown in Figure 4, Cu intermediate layer, the area affected by diffusion, and the martensite-like needle structure directed from GR5 materials to the intermediate layer are observed. In the welded samples, a good intersurface connection with optimum mechanical properties is obtained (Figure 9). In

addition, no gaps have been observed in the area adjacent to the main materials on both sides of the copper interface and no cracks have occurred in the joint area. During diffusion bonding, titanium, copper, iron, chrome, and nickel atoms have mixed in the copper interface. At welding temperature, iron and nickel have formed continuous solid solutions in irregular shapes, and the elements Ti, Ni, Cu, Fe, and Cr have produced the possible phase distributions seen in Table 3 along the intermediate layer. It has been observed that more titanium atoms are enriched in the middle and depleted in the area adjacent to the main metal. The distribution of iron has shown a model similar to titanium. The Cu component is concentrated in the center section and less Cu is detected on both sides of the center section.

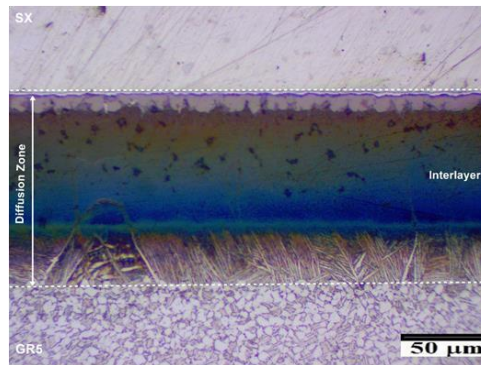


Figure 9. Diffusion zone of welded sample.

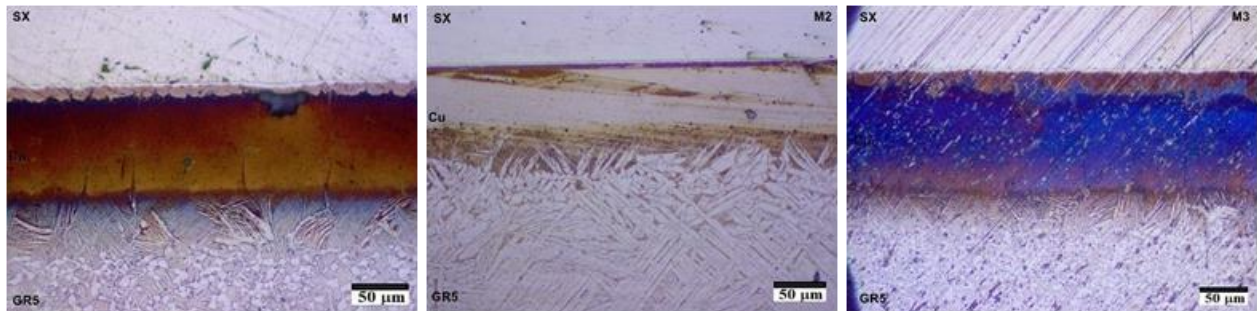


Figure 10. Optical microstructure images of materials M1, M2 and M3

The microstructure image of sample M3 is shown in Figure 11 and Figure 12 of the possible phases resulting from the welding. Based on the EDS analysis result of the

sample, element content is provided in Table 5. According to the analysis results, both the intermediate layer and the combined materials have been diffused mutually.

Table 5. EDS analysis results.

Analysis Points	Ti (at. %)	V (at. %)	Al (at. %)	C (at. %)	Fe (at. %)	Cr (at. %)	Cu (at. %)	Ni (at. %)	Si (at. %)	Possible Phases
1	-	-	-	-	54	18	-	20	8	Fe ₁₇ Ni ₆ Cr ₆ Si ₅
2	-	-	-	-	55	15	-	20	10	Si ₂₁ Cr ₁₇ Fe ₅₈ Ni ₂₀
3	-	-	-	2.19	50.9	14.2	12.5	5.35	12.8	Fe ₁₃₀ Cr ₃₉ Ni ₁₃ Si ₆₅ Cu ₂₈ C ₂₆ Fe ₁₉₀ Cr ₅₇ Ni ₁₉ Si ₉₅ Cu ₄₁ C ₃₈
4	-	-	-	-	52,5	14,5	17,5	-	15,5	Fe ₁₇ Cr ₅ Si ₁₀ Cu ₅
5	49,61	-	-	-	22,74	5,75	11,34	6,36	4,21	Ti high level
6	70,24	-	5,28	-	8,93	3,83	8,62	3,10	-	Ti high level
7	87,65	7	3,74	1,61	-	-	-	-	-	Ti ₄₁ Al ₃ V ₃ C ₃
8	94,61	-	-	-	-	-	-	-	-	Ti ₁₈₈ Al ₁₉
9	87,49	7,47	5,04	-	-	-	-	-	-	Ti ₁₃₇ Al ₁₄ V ₁₁

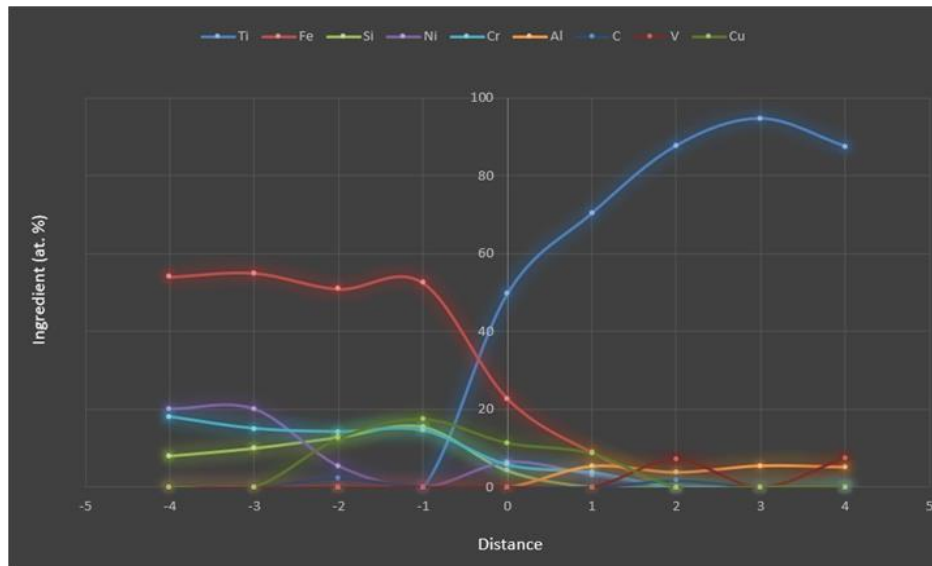


Figure 11. EDS analysis graph.

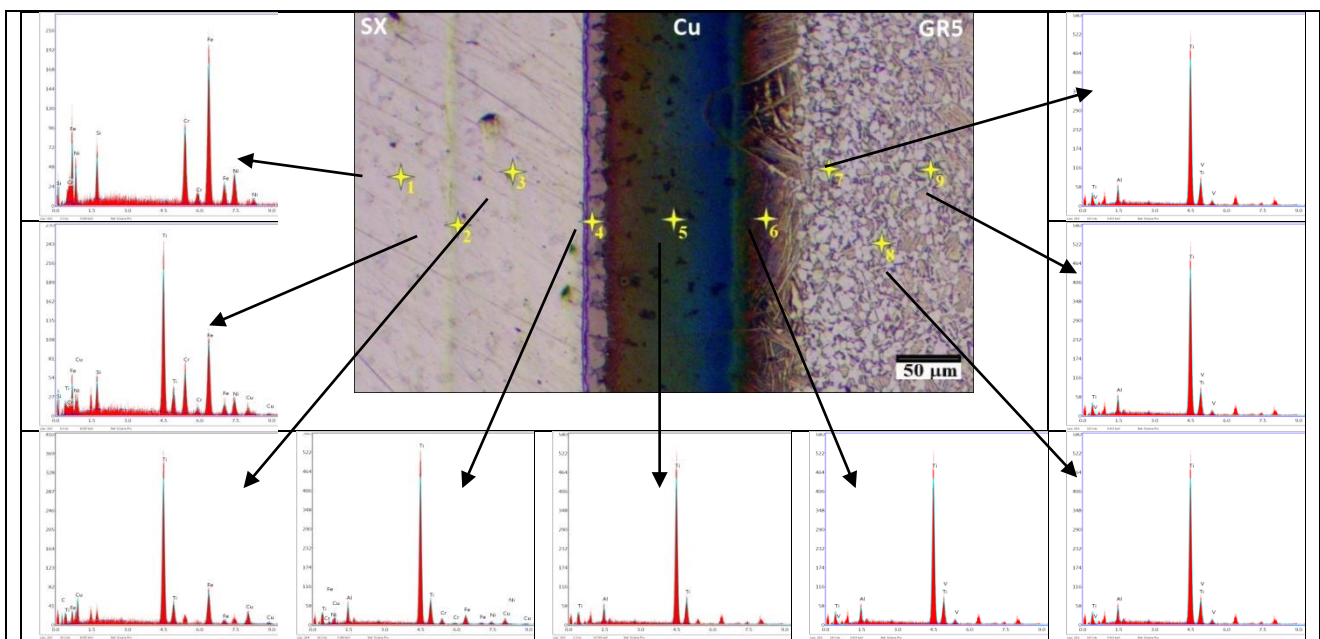


Figure 12. Points and graphics analyzed by EDAX.

When analyzing the EDS analysis of the M3 samples of the most intensive diffusion, around 75 μm on the GR5 side and 50 μm on the SX side, the elemental diffusion is observed. The presence of low carbon in the analysis is thought to have caused the increase in Chrome-Nickel diffusion. Because carbon is a transition element, it has been observed that the increasing welding speed of high rates of carbon can reduce the diffusion of the specified elements.

Microhardness Results

When the microhardness values of the samples are examined, the hardness of all samples in the diffusion area has higher values than the main materials (Table 6). The hardness has made a peak in the intermediate layer area, then reached the approximate values of the main materials. Possible phases in the intermediate layer zone have allowed the sample to achieve extreme hardness values (Figure 13).

Table 6. Microhardness table.

Material	-40	-30	-20	-10	0	+10	+20	+30	+40
M 1	166.6	305.4	462	655.9	559.8	546.3	453.9	412.7	340.4
M 2	168.9	307.6	316.8	464.4	570.9	573.8	568.1	427	369.4
M 3	183.4	336.4	325.2	368	533.2	476.8	485.6	419.8	405.8

(Vickers hardness value standard ranges for materials: SX: 210-270 HV, GR5: 330-380 HV, Cu: 40-120 HV)

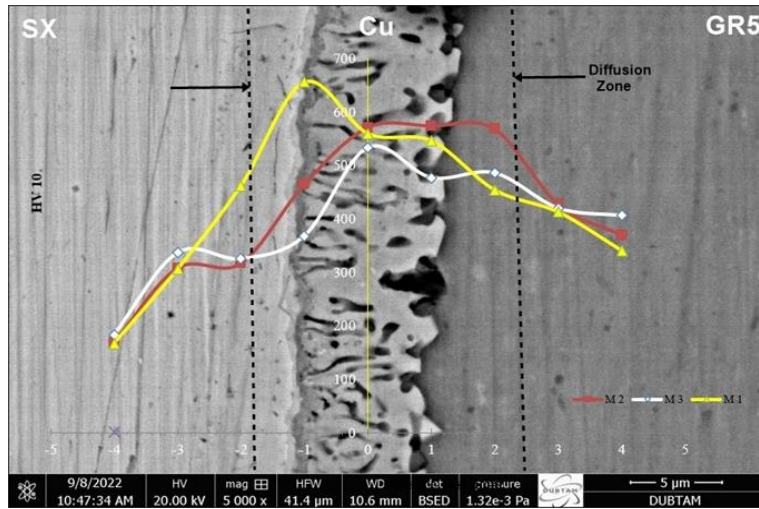


Figure 13. SEM image and hardness graph.

General Results

The combination of the GR5 titanium alloy and SX steel materials is developed at different temperatures using a copper intermediate layer and the following results have been achieved. In the combination with GR5 and SX copper interface, the diffusion of elements has created a solid solution rich in Fe, Ni, and Ti in the transition zone. This results in higher hardness values in the intermediate area. No microfractures or gaps are identified along the intermediate surface. It may have reduced the possibility of microfractures in the samples during the high plasticity diffusion pressure that is likely to occur on the intermediate surface. Metallographically, the most significant diffusion zone has been found in M3 samples combined at 1020°C. The highest hardness value occurred in M2 samples of 573.8 HV. When examining intermediary surfaces and diffusion zones of welded connections, we have extensively found $\text{Fe}_{17}\text{Ni}_6\text{Cr}_6\text{Si}_5$, $\text{Si}_{21}\text{Cr}_{17}\text{Fe}_{58}\text{Ni}_{20}$, $\text{Ti}_{41}\text{Al}_3\text{V}_3\text{C}_3$, $\text{Ti}_{137}\text{Al}_{114}\text{V}_{11}$, $\text{Fe}_{17}\text{Cr}_5\text{Si}_{10}\text{Cu}_5$, $\text{Fe}_{130}\text{Cr}_{39}\text{Ni}_{13}\text{Si}_{65}\text{Cu}_{28}\text{C}_{26}$, $\text{Fe}_{190}\text{Cr}_{57}\text{Ni}_{19}\text{Si}_{95}\text{Cu}_{41}\text{C}_{38}$ phases in all samples with the XRD analysis results.

Ethics committee approval and conflict of interest statement

"There is no need to obtain permission from the ethics committee for the article prepared"

"There is no conflict of interest with any person / institution in the article prepared"

Authors' Contributions

Güney J: Interpretation of data, drafting of manuscript.

Kejanlı H: supervised the project, critical revision.

References

- [1] X.H. L"u , Y.Q. Yang, X. Luo, B. Huang, Y.C. Li"u, Y. "Chen, Experimental and theoretical study of diffusion bonding in fabricating Ti matrix composite", *Materials Science and Engineering, A* 458. 2007. 202–209.
- [2] U. Çalig"ülü, "Ti6Al4V alaşımının g"ümüş aratabaka kullanılarak difüzyon kaynağı ile birleştirilebilirliği", *Dicle "niversitesi M"hendislik Fak"ltesi M"hendislik Dergisi*, Yıl: 2016 Cilt: 7 Sayı: 3 Sayfa: 577 – 586.

- [3] S. Çelik, I. Ay. & N. Otmanbölük, "Diffusion Bonding of Pure Copper and Aluminum in Argon Gas Atmosphere / Diffusionsfügen von Reinkupfer und Aluminium in Argonatmosphäre". *Practical Metallography*, 34 (8), 417-429 1997. <https://doi.org/10.1515/pm-1997-340807>.
- [4] M. Taskin, H. Dikbas, U. Caligulu, "Artificial neural network (ANN) approach to prediction of diffusion bonding behavior (shear strength) of Ni-Ti Alloys manufactured by powder metallurgy method", *Mathematical and Computational Applications*, 13, No. 3, pp. 183–191, 2008.
- [5] A.Y. El-Etre, M. Abdallah, Z.E. El-Tantawy, "Corrosion inhibition of some metals using law Sonia extract", 2004, *Corrosion Science*, 47. 385–395.
- [6] W.D. Callister, D.G. Rethwisch, "Materials Science and Engineering, 8nded" USA/Versailles 2009, pp. 397.
- [7] N. F. Kazakov, *An Outline of Diffusion Bonding in Vacuum, Diffusion Bonding of Materials*, 1985, pp 10.
- [8] T. Gietzelt, V. Toth, A. Huell, "Diffusion Bonding: Influence of Process Parameters and Material Microstructure". 2016, pp 206.
- [9] L. Kolařka, J. Janovec, M. Kolařiková, P. Nachtebla, "Influence of Diffusion Welding Time on Homogenous Steel Joints". 25th DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation, DAAAM, 2014.
- [10] J.D. Whittenberger, J.T. Moore. 1977. "Temperature Flow Strength, Creep Resistance and Diffusion Welding Characteristics of Ti-6Al-2Nb-1Ta-0.8Mo". Nasa Technical Memorandum -73854. [Online]. Available: <https://ntrs.nasa.gov/citations/19770012267>
- [11] H. Kejanlı, N. Katı, M.S. Keskin, "GR2-GR5 Titanyum Alaşımlarının Alüminyum Aratabaka Kullanılarak Difüzyon Kaynak Yöntemi ile Birleştirilmesi". *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 8(4), 815-825, 2017.
- [12] K. Tanrıöver, A. Taşçı, "Titanyum Alaşımlarının Isıl İşlemi", *Makine Magazin*, 58. 1997.
- [13] K. Aydın, M. Hıdıroğlu, Y. Kaya, N. Kahraman, "Titanyum ve Bakır Malzemelerin Difüzyon Kaynak Yöntemi İle Birleştirilebilirliğinin Araştırılması", *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 28 (1), 15-26, 2012.
- [14] E. Akca, A. Gursel, "The Importance of Interlayer's in Diffusion Welding" - A review. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*, Vol. 3 No. 2, 2015.
- [15] E. Akca, A. Gursel. "The Effect of Diffusion Welding Parameters on the Mechanical Properties of Titanium Alloy and Aluminum Couples". *Metals*, 2017, 7, 22.
- [16] M. Aydın, "Gözenekli Seramik Malzeme ile Paslanmaz Çeliğin Difüzyon Kaynak Yöntemiyle Birleştirilmesi". *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*. 23 (3), 595-599, 2008.
- [17] E. Atasoy, "Titanyum ve Düşük Karbonlu Çelik Çiftinin Arabağlayıcı Kullanılarak Difüzyon Kaynağı ile Birleştirilebilirliğinin Araştırılması". *Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metal Eğitimi Anabilim Dalında Bilim Uzmanlığı Tezi*, 2007.
- [18] S.V. Yadla, V. Sridevi, M.V.V.C. Lakshmi, S.P.K. Kumari, "A Review on Corrosion of Metals and Protection". *International Journal of Engineering Science & Advanced Technology*. 2 (3), 637 – 644, 2012.
- [19] D. C. Zipperian, Ph.D. "Metallographic Handbook", 1nd ed., Chief Technical Officer PACE Technologies Tucson, Arizona USA, 2011, pp. 34, 168, 139.
- [20] Y. Babayev, "Bir Kompresör Gövdesi İmalatının Toz Metalurjisi ve Difüzyon Kaynağı Yöntemleri Uygulanarak Optimizasyonu", *Dokuz Eylül Üniversitesi, Doktora Tezi. Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir*, 2007.
- [21] G. Tosun, "Östenitik (304) ve Ferritik (430) Paslanmaz Çeliklerin Bakır Aratabaka Kullanılarak Difüzyon Kaynağı ile Birleştirilmesi". *Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Mühendislik Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi*, 2022.
- [22] A. Yıldız, "Titanyum ve Ferritik Paslanmaz Çelik Malzemelerin Nikel Arabağlayıcı Kullanılarak Difüzyon Kaynak Yöntemi ile Birleştirilebilirliğinin Araştırılması". *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi*, 2014
- [23] O. Torun, İ. Çelikyürek. "Fe₃Al ve Ti6Al4V Alaşımlarının Difüzyon Kaynağı. "Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi, 28(3), 235-240, 2020.
- [24] S. Kitapçı. "AISI 4340 ve AISI 316 L Çelik Çiftinin Difüzyon Kaynağı". *Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi*, 2020.
- [25] İ. Kırık, A. İmak. "Ti6Al4V Titanyum Alaşımı ile AISI 304 Paslanmaz Çeliğinin Difüzyon Kaynağı ile Birleştirilebilirliğinin İncelenmesi". *Technological Applied Sciences*, 17(3), 46-53,2022.
- [26] B. Gülenç. "Difüzyon Sert Lehimlemesi ile Titanyum ve Düşük Karbonlu Çelik Malzemelerin Birleştirilmesi ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi". *Makine Tasarım ve İmalat Dergisi*, 5(1), 2003.
- [27] M. Jafarian, A. Khodabandeh, S. Manafi. "Evaluation of Diffusion Welding of 6061 Aluminum and AZ31 Magnesium Alloys Without Using an Interlayer". *Materials & Design* (1980-2015), 65, 160-164, 2015.



Model Predictive Trajectory Tracking Control of 2 DoFs SCARA Robot under External Force Acting to the Tip along the Trajectory

Sertaç Emre KARA¹, Osman YİĞİD², Murat ŞEN³, Mesut HÜSEYİNOĞLU^{4*}

¹ Firat University, Mechanical Engineering Department, sekara@firat.edu.tr, Orcid No: 0000-0001-7463-5867

² Firat University, Mechanical Engineering Department, yigidosman@gmail.com, Orcid No: 0000-0002-1798-1250

³ Firat University, Mechanical Engineering Department, msen@firat.edu.tr, Orcid No: 0000-0002-3063-5635

⁴ Dicle University, Mechanical Engineering Department, mesuth@dicle.edu.tr, Orcid No: 0000-0002-6130-6658

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Article history:

Received 28 April 2023
Received in revised form 08 June 2023
Accepted 14 June 2023
Available online 19 June 2023

Keywords:

2 DoFs SCARA robot, trajectory control, model predictive control

The robot arms often follow a certain trajectory depending on the type of end effector with functions of spray-painting, arc welding, bonding or machining etc. Therefore, trajectory-tracking control is a very important issue in robot arm applications. Also, the robot must be able to follow the determined trajectory stably under the influence of external forces or machining forces it encounters in its operations. In this study, a Model Predictive Control (MPC) for trajectory tracking control of a 2 Degrees of Freedom (DoFs) Selective Compliant Assembly Robot Arm (SCARA) under an external force acting to the tip of the robot along the trajectory was performed. The effectiveness of the MPC method used has been demonstrated by simulation applications. According to simulation studies, successful results were obtained.

Doi: 10.24012/dumf.1289356

* Corresponding author

Introduction

Robot arms are widely used in industrial application areas to do certain operations like welding, painting, proper positioning systems, etc. In these operations, the end effectors of the robot arms are required to move from one point to another or to follow certain trajectories as closely as possible. Trajectory tracking control is used to achieve desired trajectories. The motion tracking control of robots is one of the difficulties because of uncertainties such as load variations, friction, external disturbances, unknown nonlinearities, and a time-varying dynamics system. Therefore, trajectory-tracking control has become the most fundamental research area in the control of robot arms. Many algorithms and methods in the literature have been proposed and performed to keep accurate position control and stability in robot arms.

Computed torque control is an efficient motion control approach for robotic manipulators [1]. Wijesoma and Richards [2] suggested a method for robust accurate trajectory tracking of manipulators based on the computed torque method and variable-structure systems (VSS) theory. Researchers also use computed torque control for parallel manipulators [3], and master-slave robot manipulator systems [4]. Artificial intelligence methods compared to

analytical methods are widely used for motion control of manipulators. Saad et al. [5] investigated the trajectory-tracking problem to control the nonlinear dynamic model of the SCARA robot with 2 Degrees of Freedom (2 DoFs) using a DSP-based controller based on neural networks. The controllers rely on learning from input-output measurements rather than dynamics based on parametric models. An adaptive neuro controller for robot manipulators based on the radial basis function network is suggested by Lee and Choi [6]. Sun and Wang [7] proposed an approach based on an adaptive fuzzy control strategy for robot manipulators. The control system is constructed by combining three methods that are an independent joint control strategy, generating initial rules, and online parameter optimization through learning. An adaptive decentralized control strategy was described by Hsu and Fu [8] for the tracking control of robot manipulators driven by current-fed induction motors. With this strategy, all signals of closed-loop systems are limited to eliminate all parametric uncertainties. In another study [9], a control method called the fuzzy-based generalized predictive control is applied to a nonlinear system to overcome the limitations of the PID and the linear generalized predictive control in operating points that differed from the controller design specification. The studies of control strategy for

robot motion control based on fuzzy logic and artificial neural networks are also given in [10-14]. Sliding Mode Control (SMC), Proportional-Integral-Derivative (PID), and adaptive PID control methods have been used effectively in robot motion control. Huseyinoglu and Abut [15] implemented the SMC and PID control methods to control the 2 DoFs robot arm. The dynamic statements of the robot arm are derived by using the Lagrange-Euler method. A brand-new kind of fuzzy-sliding mode controller is addressed in [16]. To provide certain predictable performances, a sliding mode controller for robust tracking is initially created on the presumption that imposed system uncertainties fulfill matching conditions. Mustafa [17] presented a study using the three PID techniques for the control of the 2-Revolutejoint robot. A PID control law depends on neural networks and fuzzy PID controllers have been used in trajectory tracking control of two DoF robot arms [18]. Evolutionary algorithms (EAs) have emerged as an alternative design technique for robot motion control applications [19] and [20]. Real-time sliding mode and PID control of triglide robot and RCM mechanism are presented in [21] and [22]. Abut and Soyguder [23] used the adaptive computed torque control method for real-time control of bilateral teleoperation system. Then, they applied the optimal adaptive computed torque control method to haptic teleoperation robotic systems in order to eliminate dynamic uncertainty, which is one of the main problems in haptic systems [24].

Many researchers have used the Model Predictive Control (MPC) method [25-27], which provides a more robust control for robot trajectory. The basic concept of this control approach is to predict the future behavior of a system up to a determined finite prediction horizon time by minimizing the finite horizon cost function defined under the future states with some determined constraints. Although the history of MPC dates back to Zadeh and Whalen [28] and Propoi [29], its popularity has gradually increased with its use in the chemical process industry [30-31]. This control method generally relies on a system attempting to predict the future behavior of the system for each step in a defined horizon. While doing this, it is ensured that the horizon objective function created is minimized under certain constraints [32]. Houzhang et al. [33], studied controlling a vehicle semi-active suspension system by using an explicit model predictive control approach in which the control law computation requirement is low. Some researchers used MPC for controlling mobile robots and autonomous ground vehicles under some determined vehicles [34-35]. Guechi et al. [36], resented a comparative control study of a planar two DoFs robot arm by using MPC and LQ control methods. The nonlinear dynamic equations of the robot were linearized by using the feedback linearization method and the MPC control parameters were optimized analytically minimizing a cost function.

In this study, trajectory tracking control of 2 DoFs Selective Compliant Assembly Robot Arm (SCARA) under external force acting on the tip along the trajectory is performed by using the MPC method.

Kinematic and Dynamic Equations of 2 DoFs SCARA Robot

In this section, the kinematic and dynamic equations are given for 2 DoFs SCARA robot. The parameters and the coordinates of the robot are illustrated in Figure 1 below.

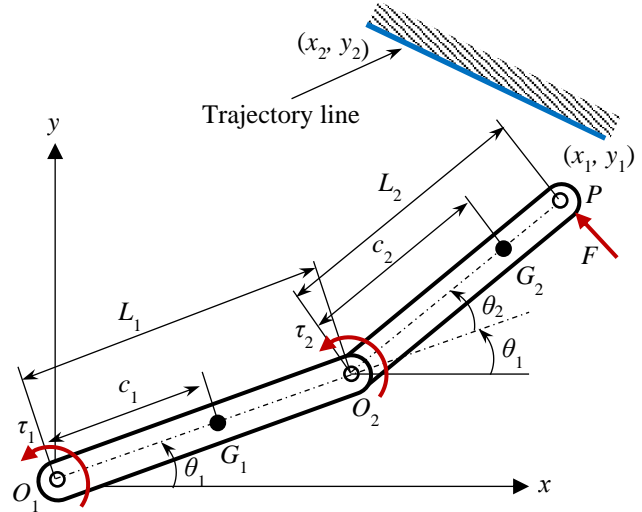


Figure 1. 2 DoFs SCARA robot arm.

As seen in Figure 1, an external force (F) is applied to the endpoint of the robot through the trajectory line. This force is assumed to be perpendicular to link 2. The generalized coordinates for link 1 and link 2 are θ_1 and θ_2 , the torques are τ_1 and τ_2 respectively. The lengths of the links are L_1 and L_2 , and the positions of the center of gravity (G_1, G_2) of the links are c_1 and c_2 . The position of the endpoint of the robot in the x-y coordinate system can be calculated by using Equation 1 with the angular displacements and the dimensions of the links.

$$\begin{aligned} x &= L_1 \cos(\theta_1) + L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ y &= L_1 \sin(\theta_1) + L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \end{aligned} \quad (1)$$

For a prescribed endpoint position in the x-y plane (in the limits of the robot workspace), the required angular displacements can be calculated by using Equation 2. The kinetic and potential energy terms for a 2 DoFs robot can be written for the links with Equation (3)

$$\begin{aligned} \theta_2 &= \cos^{-1} \left(\frac{x^2 + y^2 - L_1^2 - L_2^2}{2L_1L_2} \right) \\ \theta_1 &= \tan^{-1} \left(\frac{y(L_1 + L_2 \cos \theta_2) - xL_2 \sin \theta_2}{x(L_1 + L_2 \cos \theta_2) + yL_2 \sin \theta_2} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} T_1 &= \frac{1}{2} (m_1 c_1^2 + I_1) \dot{\theta}_1^2 \\ U_1 &= m_1 g c_1 \sin \theta_1 \\ T_2 &= \frac{1}{2} m_2 \left(\begin{aligned} &L_1^2 \dot{\theta}_1^2 + c_2^2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 + \dots \\ &\dots 2L_1 \dot{\theta}_1 c_2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \cos \theta_2 + \dots \\ &\dots \frac{1}{2} I_2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 \end{aligned} \right) \\ U_2 &= m_2 g (L_1 \sin \theta_1 + c_2 \sin(\theta_1 + \theta_2)) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \tau_1 &= \begin{pmatrix} (\alpha + 2\beta \cos \theta_2) \ddot{\theta}_1 + (\delta + \beta \cos \theta_2) \ddot{\theta}_2 - \dots \\ \dots \beta \sin \theta_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 - \beta \sin \theta_2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \dot{\theta}_2 \end{pmatrix} \quad (4) \\ \tau_2 &= (\delta + \beta \cos \theta_2) \ddot{\theta}_1 + \delta \ddot{\theta}_2 + \beta \sin \theta_2 \dot{\theta}_1^2 \end{aligned}$$

The equations of motion of the SCARA robot are obtained by using Lagrange Function as follows:

Where,

$$\begin{aligned} \alpha &= I_1 + I_2 + m_1 c_1^2 + m_2 (L_1^2 + c_2^2) \\ \beta &= m_2 L_1 c_2 \\ \delta &= I_2 + m_2 c_2^2 \end{aligned} \quad (5)$$

The equations given in Equation 4 are non-linear and do not contain potential energy terms as the SCARA robot moves in the parallel plane to the ground. It can be rearranged in compact form as follow:

$$M \ddot{\theta} + C = \tau \quad (6)$$

Where,

$$\begin{aligned} M &= \begin{bmatrix} \alpha + 2\beta \cos \theta_2 & \delta + \beta \cos \theta_2 \\ \delta + \beta \cos \theta_2 & \delta \end{bmatrix} \\ \ddot{\theta} &= \{\ddot{\theta}_1 \quad \ddot{\theta}_2\}^T \\ C &= \begin{bmatrix} -2\beta \sin \theta_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 - \beta \sin \theta_2 \dot{\theta}_2^2 \\ \beta \sin \theta_2 \dot{\theta}_1^2 \end{bmatrix} \\ \tau &= \{\tau_1 \quad \tau_2\}^T \end{aligned} \quad (7)$$

Equation 6 is obtained for the system without an external force. For an external force that is applied to the robot tip as given in Figure 2, the effect of the force can be obtained using the virtual work approach. The virtual displacements of the tip concerning the joints can be written as in Equation (8) and Equation (9).

$$T_{\theta_1} = \frac{\partial Q}{\partial \theta_1} = \begin{pmatrix} F^x (-L_1 \sin \theta_1 - L_1 \cos \theta_1 \delta \theta_1 - 2L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) - 2L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \delta(\theta_1 + \theta_2)) + \dots \\ \dots F^y (L_1 \cos \theta_1 - L_1 \sin \theta_1 \delta \theta_1 + 2L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) - 2L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \delta(\theta_1 + \theta_2)) \end{pmatrix} \quad (12)$$

$$T_{\theta_2} = \frac{\partial Q}{\partial \theta_2} = \begin{pmatrix} F^x (-2L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) - 2L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \delta(\theta_1 + \theta_2)) + \dots \\ \dots F^y (2L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) - 2L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \delta(\theta_1 + \theta_2)) \end{pmatrix}$$

The dynamic model of the robot with tip force is rearranged as follows.

$$M \ddot{\theta} + C + T = \tau \quad , \quad T = \{T_{\theta_1} \quad T_{\theta_2}\}^T \quad (13)$$

MPC Controller Design

In this section, the design of the MPC controller, which is designed to follow the trajectory under the influence of an external force acting on the tip of the SCARA robot, whose general motion equations are given by Equation (14) is given. Model predictive control (MPC) as mentioned in previous sections is a robust control

$$\begin{aligned} \delta R_{O_2P}^x &= -L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \delta(\theta_1 + \theta_2) \\ \delta R_{O_2P}^y &= L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \delta(\theta_1 + \theta_2) \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \delta R_{O_1P}^x &= -L_1 \sin \theta_1 \delta \theta_1 - L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \delta(\theta_1 + \theta_2) \\ \delta R_{O_1P}^y &= L_1 \cos \theta_1 \delta \theta_1 + L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \delta(\theta_1 + \theta_2) \end{aligned} \quad (9)$$

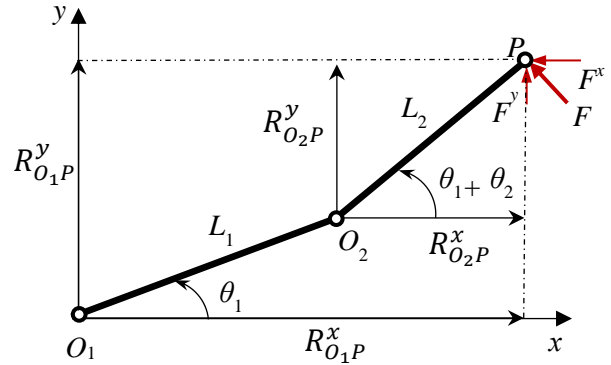


Figure 2. The position vectors of the tip according to the joints

The virtual work done by the applied force to the tip can be determined with Equation (10).

$$\begin{aligned} Q_1 &= F^x \delta R_{O_2P}^x + F^y \delta R_{O_2P}^y \\ Q_2 &= F^x \delta R_{O_1P}^x + F^y \delta R_{O_1P}^y \end{aligned} \quad (10)$$

The total virtual work can be obtained with Equation (11).

$$\begin{aligned} Q &= Q_1 + Q_2 \\ &= \left(F^x (-L_1 \sin \theta_1 - 2L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2)) + \dots \right) \\ &= \left(\dots F^y (L_1 \cos \theta_1 + 2L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2)) \delta(\theta_1 + \theta_2) \right) \end{aligned} \quad (11)$$

The calculated moments acting on Joint 1 and Joint 2 can be obtained with partial differential concerning θ_1 and θ_2 .

method that minimizes a cost function with some constraints for dynamical systems through a finite horizon time [32]. The concept of this control method depends on the prediction of the future response of the examined dynamic system for each instance up to horizon time by minimizing a cost function. An MPC control block diagram is illustrated in Figure 3 schematically, where r , u , y , and z represent the desired input, control signal, output, and disturbances respectively.

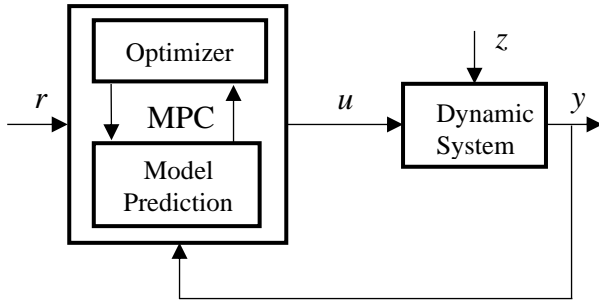


Figure 3. MPC controller system block diagram.

Equation (13) can be written as follows, together with the related variables.

$$M(\theta)\ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta}) + T(\theta) = \tau \quad (14)$$

The error functions can be written as follows where subscript (d) represents the desired condition.

$$\begin{aligned} e(t) &= \theta_d(t) - \theta(t) \\ \dot{e}(t) &= \dot{\theta}_d(t) - \dot{\theta}(t) \\ \ddot{e}(t) &= \ddot{\theta}_d(t) - \ddot{\theta}(t) \end{aligned} \quad (15)$$

By rearranging Equation 14, the following expression can be obtained.

$$\ddot{\theta} = M(\theta)^{-1} (\tau - C(\theta, \dot{\theta}) - T(\theta)) \quad (16)$$

Where u is the synthetic control vector as follows [36]:

$$u = \{u_1 \quad u_2\}^T \quad (17)$$

The actual control torque can be written by using this synthetic control torque with Equation (18).

$$\tau = M(\theta)u + C(\theta, \dot{\theta}) + T(\theta) \quad (18)$$

The linearized decoupled equations are given as follows:

$$\begin{aligned} \ddot{\theta}_1 &= u_1 \\ \ddot{\theta}_2 &= u_2 \end{aligned} \quad (19)$$

In the case of the selection of the control law as proportional-derivative (PD) [36].

$$\begin{aligned} u_1 &= k_1(\theta_{1d} - \theta_1) + k_2(\dot{\theta}_{1d} - \dot{\theta}_1) \\ u_2 &= k_3(\theta_{2d} - \theta_2) + k_4(\dot{\theta}_{2d} - \dot{\theta}_2) \end{aligned} \quad (20)$$

Where,

$$\begin{aligned} k_1 &= \omega_1^2; k_2 = 2\zeta_1\omega_1 \\ k_3 &= \omega_2^2; k_4 = 2\zeta_2\omega_2 \end{aligned} \quad (21)$$

Using Equations (15-16) the following linearized expression can be written for input to the system.

$$u = \ddot{\theta}_d + M(\theta)^{-1}(C(\theta, \dot{\theta}) + T(\theta) - \tau) \quad (22)$$

Then the computed torque can be expressed with Equation (23).

$$\tau = M(\theta)(\ddot{\theta}_d - u) + C(\theta, \dot{\theta}) + T(\theta) \quad (23)$$

The input torque can be obtained using the control law as follows.

$$\tau = M(\theta)(\ddot{\theta}_d + K_d\dot{e} + K_p e) + C(\theta, \dot{\theta}) + T(\theta) \quad (24)$$

The prediction model can be written in the determined time interval with horizon t to $t+h$ assuming $u(t)=u$ is constant as follows:

$$\begin{aligned} \dot{\theta}_1(t+h_1) &= u_1 h_1 + \dot{\theta}_1(t) \\ \theta_1(t+h_1) &= \frac{1}{2} u_1 h_1^2 + \dot{\theta}_1(t) h_1 + \theta_1(t) \\ \dot{\theta}_2(t+h_2) &= u_2 h_2 + \dot{\theta}_2(t) \\ \theta_2(t+h_2) &= \frac{1}{2} u_2 h_2^2 + \dot{\theta}_2(t) h_2 + \theta_2(t) \end{aligned} \quad (25)$$

With constant reference angles, the cost functions can be written with Equation (23).

$$\begin{aligned} J_1 &= e_1^2(t+h_1) + \rho_1 \dot{e}_1^2(t+h_1) \\ J_2 &= e_2^2(t+h_2) + \rho_2 \dot{e}_2^2(t+h_2) \end{aligned} \quad (26)$$

Here, ρ_1 and ρ_2 are the weight factors. The required control gains can be calculated with Equation (27).

$$\begin{aligned} k_1 &= \frac{2}{h_1^2 + 4\rho_1}; k_2 = \frac{2h_1^2 + 4\rho_1}{h_1^3 + 4\rho_1 h_1} \\ k_3 &= \frac{2}{h_2^2 + 4\rho_2}; k_4 = \frac{2h_2^2 + 4\rho_2}{h_2^3 + 4\rho_2 h_2} \end{aligned} \quad (27)$$

Using Equation (21) the following expressions can be obtained.

$$\frac{\theta_1(s)}{\theta_{1d}(s)} = \frac{k_1}{s^2 + k_2 s + k_1}; \frac{\theta_2(s)}{\theta_{2d}(s)} = \frac{k_3}{s^2 + k_4 s + k_3} \quad (28)$$

Equation (29) can be written using Equation (21) and Equation (28) [36].

$$\begin{aligned} 2\zeta_1\omega_1 &= \frac{2h_1^2 + 4\rho_1}{h_1^3 + 4\rho_1 h_1}; \omega_1^2 = \frac{2}{h_1^2 + 4\rho_1} \\ 2\zeta_2\omega_2 &= \frac{2h_2^2 + 4\rho_2}{h_2^3 + 4\rho_2 h_2}; \omega_2^2 = \frac{2}{h_2^2 + 4\rho_2} \end{aligned} \quad (29)$$

The weight factors can be calculated with Equation (30).

$$\rho_1 = \frac{2 - \omega_1^2 h_1^2}{4\omega_1^2}; \rho_2 = \frac{2 - \omega_2^2 h_2^2}{4\omega_2^2} \quad (30)$$

The roots of the equations obtained by substituting Equation (30) into Equation (29) can be calculated as follows [36].

$$\lambda_{1,2} = 2\zeta_1 \pm \sqrt{4\zeta_1^2 - 2} \tag{31}$$

$$\lambda_{3,4} = 2\zeta_2 \pm \sqrt{4\zeta_2^2 - 2}$$

From Equation (31), for the positive weight factors Equation (32) can be written.

$$2(4\zeta_1^2 - 2) - \zeta_1 \sqrt{4\zeta_1^2 - 2} < 0 \tag{32}$$

$$2(4\zeta_2^2 - 2) - \zeta_2 \sqrt{4\zeta_2^2 - 2} < 0$$

By choosing ζ_1 , ζ_2 , ω_1 and ω_2 as design parameters, h_1 and h_2 can be determined.

Trajectory Control Simulations

In this section, some simulation studies are given to show the effectiveness of the MPC method for control applications of the SCARA robot. The physical and mechanical parameters of the robot used for simulation studies are given in Table 1.

For simulation studies, a trajectory line illustrated in Figure 1 was created between two points in the workplace of the robot as $(x_1=0.438, y_1=0.315; x_2=0.168, y_2=0.491)$. The external force was assumed to be perpendicular to link 2 through the trajectory line. The linear position graphs with and without external force are obtained for both the actual and the desired conditions comparatively in Figure 4.

Table 1. The physical and mechanical parameters of the SCARA robot.

Parameters	Values
L_1 : Length of link 1 (m)	0.390
L_2 : Length of link 1 (m)	0.156
c_1 : Center of gravity of link 1 (m)	0.195
c_2 : Center of gravity of link 2 (m)	0.078
m_1 : Mass of link 1 (kg)	3.3
m_2 : Mass of link 2 (kg)	0.3
I_1 : Mass moment of inertia for center of gravity link 1 (kgm ²)	0.12550
I_2 : Mass moment of inertia for center of gravity link 2 (kgm ²)	0.00183
F : External force (N)	1
θ_1 : Rotational displacement of link 1 (degree)	(degree)
θ_2 : Rotational displacement of link 2 (degree)	(degree)
τ_1 : Torque of link 1 (Nm)	(Nm)
τ_2 : Torque of link 2 (Nm)	(Nm)

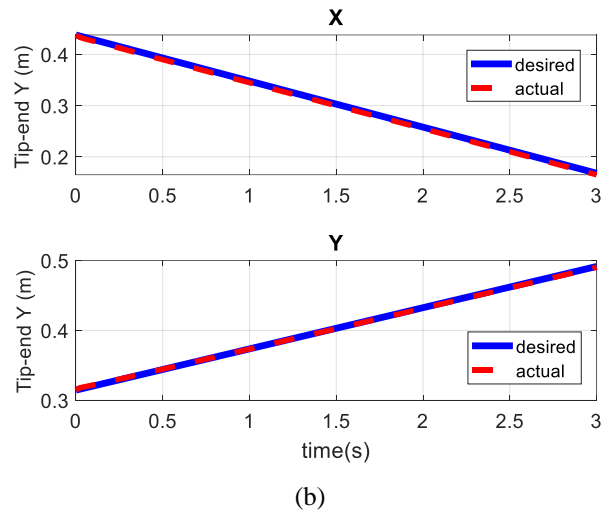
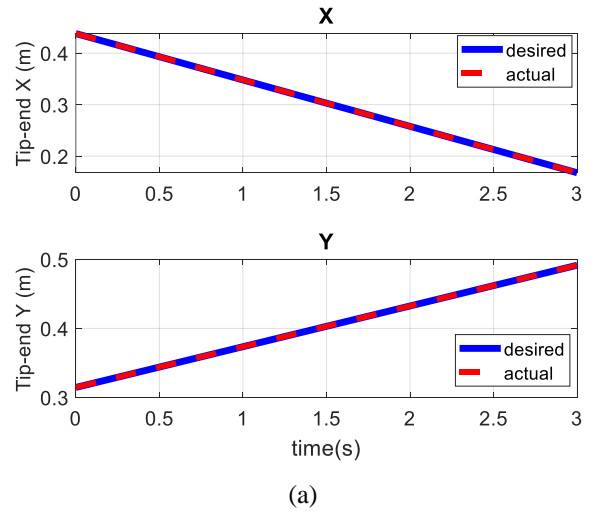


Figure 4. Comparison of the linear positions of the actual and desired conditions for each link (a) without external force, (b) with external force.

In addition, the angular positions for the desired and the obtained conditions are given in Figure 5. The required torques for the trajectory tracking through the determined trajectory line are given in Figure 6 for free and with external force conditions comparatively.

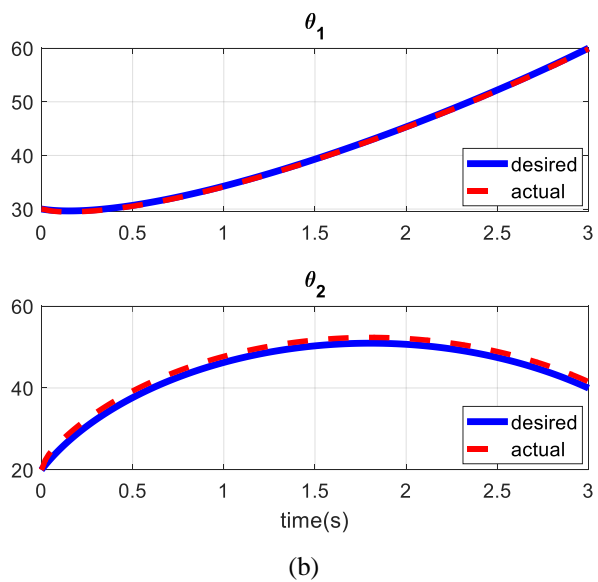
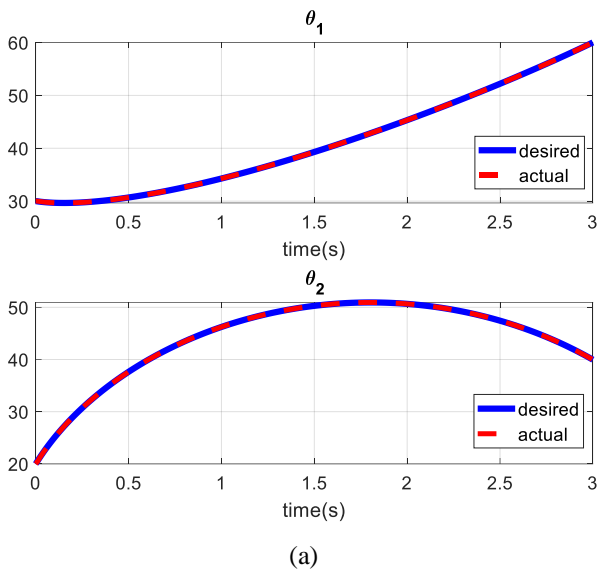


Figure 5. Comparison of the angular positions of the actual and desired conditions for each link (a) without external force, (b) with external force.

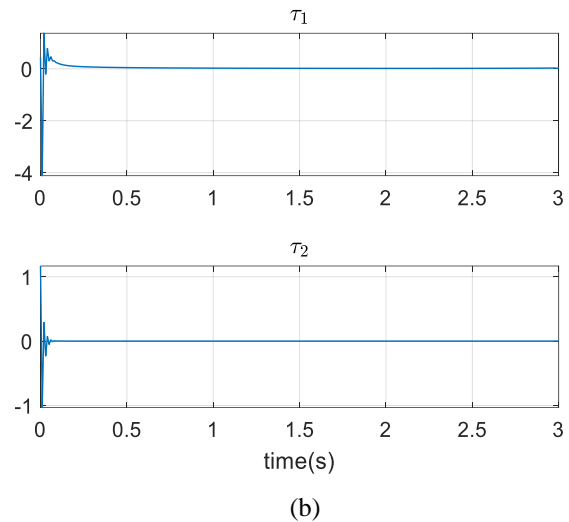
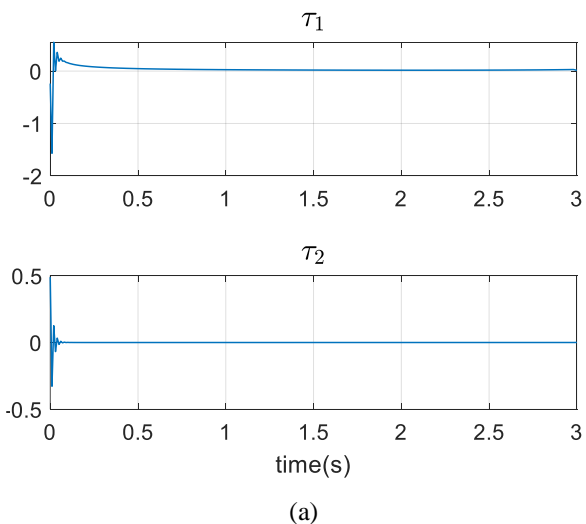


Figure 6. Comparison of the errors for each link (a) without external force, (b) with external force.

Results and Discussion

In this study, trajectory control of a SCARA robot with 2 DoFs was carried out under the influence of a certain external force acting on the tip of the robot through the trajectory line. For this, the MPC method, which is a very robust control method, was used. The PD control rule was preferred as the control law to be used in the MPC method. A trajectory line was created to be followed by the tip of the robot arm. An external force with constant magnitude was applied to the tip to be perpendicular to link 2 through the trajectory line. Performing some simulation studies, the desired and the controlled position graphs were obtained for both with and without external force conditions. The required input torques are larger for the case of external force as expected. According to the simulation results, the control of the robot for both cases was performed successfully by using the MPC method.

References

- [1] R. H. Middleton and G. C. Goodwin, "Adaptive computed torque control for rigid link manipulations," *Syst. Control Lett.*, vol. 10, pp. 9–16, 1988.
- [2] S. W. Wijesoma and R. J. Richards, "Robust Trajectory Following of Robots Using Computed Torque Structures with VSS", *International Journal of Control*, 52 (1990), 4, pp. 935-962
- [3] Z. Yang, J. Wu, J. Mei, J. Gao, and T. Huang, "Mechatronic Model Based Computed Torque Control of a Parallel Manipulator," *Int. J. Adv. Robot. Syst.*, vol. 5, no. 1, pp. 123–128, 2008.
- [4] O. O. Obadina, M. Thaha, K. Althoefer, and M. H. Shaheed, "A Modified Computed Torque Control Approach for a Master-Slave Robot Manipulator System," in *Towards Autonomous Robotic Systems. TAROS 2018. Lecture Notes in Computer Science*, vol. 10965, M. Giuliani, T. Assaf, and M.

- Giannaccini, Eds. Springer, Cham, 2018, pp. 28–39.
- [5] M. Saad, P. Bigras, L. Dessaint, and K. Al-Haddad, “Adaptive Robot Control Using Neural Networks”, *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, Vol.41, No: 2. 1994.
- [6] M. Lee, and Y. Choi, “An Adaptive Neurocontroller Using RBFN for Robot Manipulators”, *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, Vol.51, (2004).
- [7] W. Sun and Y. Wang, “An Adaptive Fuzzy control for Robotic Manipulators”, *International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision*, Kunming China, 1952-1956, (2004).
- [8] S. H. Hsu and L. C. Fu, “Adaptive decentralized control of robot manipulators driven by current-fed induction motors”, *IEEE/ASME Trans. Mechatronic*, 10 (2005), 4, pp. 465-468.
- [9] J. Cronin, J. M. Escano, S. Roshany-Yamchi and N. Canty, “Fuzzy-Based Generalized Predictive Control of a Robotic Arm”, *Proceedings, 25th IET Irish Signals & Systems Conference*, 2014.
- [10] R. Wai, “Tracking Control Based on Neural Network Strategy for Robot Manipulator”, *Neurocomputing*, 51, 425-445, (2003).
- [11] K. Lochan and B. K. Roy, “Control of Two-link 2-DOF Robot Manipulator Using Fuzzy Logic Techniques: A Review”, *Proceedings, 4 th International Conference on Soft Computing for Problem Solving*, Warsaw, Poland, 2014
- [12] N. Mendes and P. Neto, “Indirect adaptive fuzzy control for industrial robots: a solution for contact applications”, *Expert Systems with Applications*, 42 (2015), 22, pp. 929-935
- [13] W. He, Y. Chen and Z. Yin, “Adaptive neural network control of an uncertain robot with full-state constraints”, *IEEE Trans. Cybern*, 46 (2016), 3, pp. 620-629
- [14] H. Chaudhary, V. Panwar, R. Prasad and N. Sukavanam, “Adaptive Neuro Fuzzy Based Hybrid Force/Position Control for an Industrial Robot Manipulator”, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 27 (2016), 6, pp. 1299-1308
- [15] M. Huseyinoglu and T. Abut, “Dynamic model and control of 2-dof robotic arm”, *European Journal of Technique (EJT)*, 8(2), 141-150. 2018.
- [16] S. Choi, and J. Kim, “A Fuzzy-Sliding Mode Controller for Robust Tracking of Robotic Manipulators”, *Mechatronics*, Vol.7, 199-216, (1997).
- [17] A. M. Mustafa, “Modeling, simulation and control of 2-R robot”, *Global Journals of Research in Engineering*, 14(H1), 49-54. 2014
- [18] J. P. Perez, R. Soto, A. Flores, F. Rodriguez, and J. L. Meza, “Trajectory Tracking Error Using PID Control Law for Two-Link Robot Manipulator via Adaptive Neural Networks”, *Procedia Technology*, vol. 3, pp. 139–146, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2012.03.015>
- [19] Q. Ma and X. Lei, “Dynamic Path Planning of Mobile Robots Based on ABC Algorithm”, *Lecture Notes in Computer Science*, pp. 267–274, 2010. https://doi.org/10.1007/978-3-642-16527-6_34
- [20] P. V. Savsani and R. L. Jhala, “Optimal Motion Planning For a Robot Arm by Using Artificial Bee Colony (ABC) Algorithm”, *International Journal of Modern Engineering Research (IJMER)*, vol. 2, no. 6, pp. 4434–4438, 2012.
- [21] M. Aydin and O. Yakut, “Real-time control of triglide robot using sliding mode control method”, *Industrial Robot: An International Journal*, 45(1), 89-97, 2018.
- [22] S. Aksungur, M. Aydin and O. Yakut, “Real-time PID control of a novel RCM mechanism designed and manufactured for use in laparoscopic surgery”, *Industrial Robot: An International Journal*, 47(2), 153-166, 2020.
- [23] T. Abut and S. Soyguder, “Real-time control of bilateral teleoperation system with adaptive computed torque method”, *Industrial Robot: An International Journal*, 44(3), 299-311, 2017.
- [24] T. Abut and S. Soyguder, “Optimal adaptive computed torque control for haptic-teleoperation system with uncertain dynamics”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 236(4), 800-817, 2022.
- [25] C. E. Garcia, D. M. Prett and M. Morari, “Model Predictive Control: Theory and Practice a Survey”, *Automatica*, Vol. 25, No. 3, pp. 335-348, 1989.
- [26] M. Nauman, W. Shireen and A. Hussain, “Model-Free Predictive Control and Its Applications”, *Energies*, 15, 5131 2022 <https://doi.org/10.3390/en15145131>.
- [27] S. Qina and T. A. Badgwell, “A survey of industrial model predictive control technology”, *Control Engineering Practice* 11 733–764, 2003
- [28] L. A. Zadeh, and B. H. Whalen, “On optimal control and linear programming”, *IRE Trans. Aut. Control*, 7(4), 45, 1962.
- [29] A. I. Propoi, “Use of LP methods for synthesizing sampled-data automatic systems”, *Autumn Remote Control*, 24, 837, 1963.
- [30] R. K. Mehra, R. Rouhani, J. Eterno, J. Richalet and A. Rault, “Model algorithmic control: review and recent development”. *Engng Foundation Conf. on*

Chemical Process Control II, Sea Island, Georgia, pp. 287-310, 1982.

- [31] D. M. Prett and R. D. Gillette, "Optimization and constrained multivariable control of a catalytic cracking unit". *AIChE National Mtg*, Houston, Texas; also *Proc. Joint Aut. Control Conf.*, San Francisco, California, 1979.
- [32] P. E. Orukpe, "Model Predictive Control Fundamentals", *Nigerian Journal of Technology*, Vol. 31, No. 2, pp. 139-148, 2012.
- [33] Z. Houzhong, L. Jiasheng, Y. Chaochun, S. Xiaoqiang and C. Yingfeng, "Application of explicit model predictive control to a vehicle semi-active suspension system", *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, 39(3) 772-786, 2020.
- [34] S. S. Oyelere, "The Application of Model Predictive Control (MPC) to Fast Systems such as Autonomous Ground Vehicles (AGV)", *Journal of Computer Engineering*, 16(3), 27-37, 2014.
- [35] G. B. Avanzini, A. M. Zanchettin and P. Rocco "Reactive Constrained Model Predictive Control for Redundant Mobile Manipulators", *Advances in Intelligent Systems and Computing book series (AISC, volume 302)*.
- [36] E. H. Guechi, S. Bouzoualegh, Y. Zennir and S. Bllazic, "MPC Control and LQ Optimal Control of A Two-Link Robot Arm: A Comparative Study", *Machines*, 6, 37, 2018.



Ultrasonik işlemin düşük dereceli kömürün kolon flotasyonu üzerine etkisi

The effect of ultrasonic process on column flotation of low-grade coal

Kiraz Eşmeli*

¹ Konya Teknik Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, kesmeli@ktun.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5699-5199>

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 26 Ocak 2023
Revizyon 27 Mart 2023
Kabul 27 Mart 2023
Online 30 Haziran 2023

Anahtar Kelimeler:

kolon flotasyonu, ultrasonik enerji, temas açısı, linyit

ÖZ

Bu çalışmada, ultrasonik işlemin düşük dereceli linyit kömürünün kolon flotasyonu üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Ayrıca ultrasonun gücü ve muamele süresi flotasyon sürecini önemli derecede etkilemiş ve en iyi değerler 60 Watt ultrason gücünde ve 3 dakikalık muamele süresinde elde edilmiştir. Ultrasonik işlemin güç değerlerinin ve muamele süresinin daha fazla artması flotasyon başarısını olumsuz yönde etkilemiştir. Optimum kül içeriği ve yanabilir verim değerleri 1000 g/ton toplayıcı ve 2000 g/ton köpürtücü konsantrasyon değerlerinde elde edilmiştir. Ultrasonik işlemin uygulanması flotasyon reaktiflerinin aktivitesini artırarak flotasyon sürecini iyileştirmiştir. Ayrıca ultrasonla yapılan deneylerde temas açısı değerlerinin aynı deneysel koşullar altında klasik yapılan deneylere göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Sonuç olarak, % 28,01 kül içeriğine sahip kömür, ultrasonik işlem kullanılarak % 13,94 kül içeriği ve % 76,25 yanabilir verim ile zenginleştirilmiştir.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 26 January 2023
Received in revised form 27 March 2023
Accepted 27 March 2023
Available online 30 June 2023

Keywords:

Column flotation, ultrasound energy, contact angle, lignite

ABSTRACT

In this study, the influence of ultrasonic treatment on column flotation of low-grade lignite coal was investigated. In addition, the power of ultrasonic and the time of treatment significantly influenced the flotation process, and the best values were obtained at an ultrasound power of 60 Watt and a treatment time of 3 min. The increase in the power values and treatment time of the ultrasonic process had a negative effect on the flotation success. The optimum the ash content and combustible efficiency values were obtained at 1000 g/ton collector and 2000 g/ton frother concentration values. The application of ultrasonic treatment improved the flotation process by increasing the activity of flotation reagents. In addition, it was found that the contact angle values were higher in the experiments performed with ultrasound compared to the experiments performed without ultrasound under the same experimental conditions. As a result, coal with an ash content of 28.01% was enriched with an ash content of 13.94% and a combustible yield of 76.25% using ultrasonic process.

Doi: 10.24012/dumf.1242695

* Sorumlu Yazar

Giriş

İnce boyutlu kömürlerin zenginleştirilmesinde flotasyon, yağ aglomerasyonu ve flokülasyon yöntemleri kullanılmakta ve bu yöntemlerde organik ve inorganik bileşenlerinin yüzey özelliklerindeki farklılıklardan yararlanılmaktadır. Flotasyon işleminde, mineraller, uygun reaktiflerle muamele edildikten sonra bazı mineralin yüzdürülmesi bazı minerallerin ise bastırılarak minerallerin birbirinden ayrılması sağlanmaktadır. Kolon flotasyonunda ise zenginleştirme, ince tane boyutuna sahip minerallerin seçimliliğini artırmak için ters akım tekniğine dayanmaktadır. Ayrıca, konsantre ve artık ürünlerinin kolaylıkla kontrol altında tutulabilmesi, seçimliliğinin yüksek olması ve enerji tasarrufu sağlaması kolon flotasyonunun sağladığı bazı önemli avantajlardır [1]. Kolon hücreleri, özellikle yüksek hidrofobisiteye sahip cevherlerde oldukça iyi sonuçlar vermektedir.

Ultrases dalgası, nadir ve sıkıştırma döngüleri olarak sırayla yayılırken, nadir döngüde oluşan mikro kabarcıklar, sıkıştırma döngüsünde anlık bir çökmeye neden olarak lokalize bir enerji patlaması oluşturur. Buna kavitasyon denir ve ultrason işleminin en önemli özelliğidir [2-5]. Kavitasyon kabarcıkları "geçici kavitasyon" ve "stabil kavitasyon" olarak ikiye ayrılır [3]. Geçici kavitasyon kabarcıkları, boyutlarının genişlemesinden sonra pozitif basınç yarı döngüsü sırasında şiddetli bir şekilde çöker ve birçok küçük kabarcığa bölünür [3,6]. Kavitasyon kabarcıklarının yapıları, kabarcıklar ve parçacıklar arasındaki mineralizasyonun verimliliğini etkilemektedir. Son yıllarda, ince kömür parçacıklarının flotasyon performansını iyileştirmek için ultrasonik işlem kullanılmaktadır [2, 4, 5, 7-16]. Ultrases işleminin flotasyon çalışmalarında olumlu etkisinin nedeni olarak, akustik kavitasyonun partikül yüzeylerini temizlediği ve reaktiflerin etkisini kolaylaştırmak için şlam kaplamalarını en aza indirdiği ve böylece reaktif tüketimini azalttığı belirtilmektedir [17]. Ayrıca, flotasyon işlemi sırasında ultrasonik kavitasyon sonucu oluşan mikro kabarcıkların, kabarcık-kömür bağlanma verimliliğini artırdığı belirtilmiştir [7]. Bununla birlikte, ultrases işleminin fiziksel ve kimyasal etkileri henüz açıklanamamıştır. Ultrasonik işlemin farklı yoğunluklarda ve sürelerde kullanımının yanı sıra farklı yöntemlerde (ön işlem ve eşzamanlı) kullanımı da farklı sonuçlara yol açmaktadır. Ultrases işleminin ön işlem olarak kullanıldığı flotasyon çalışmalarında flotasyon başarısındaki artış, mineral yüzeyin geçici kavitasyon etkisi ile temizlenmesine ve dolayısıyla flotasyon reaktiflerinin süspansiyonda daha iyi dağılmasına bağlanmıştır [9,10,13,14,18,19].

Bu çalışmada yüksek kül içerikli linyit kömürünün kolon flotasyonu ile zenginleştirilmesi ve ultrases ön işlemin etkisi araştırılmıştır. Ayrıca, optimum çalışma koşulları tespit edilerek ultrasonik ön işlemin kömürün yanabilir verim, kül içeriği ve temas açısı değerleri üzerindeki etkisi belirlenmiştir.

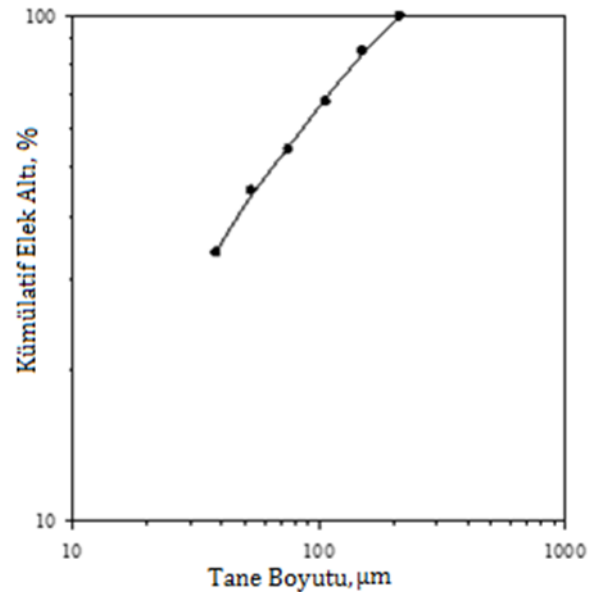
Malzeme ve Yöntem

Malzeme

Deneylerde Konya'nın Ilgın ilçesinden temin edilen linyit örneği kullanılmıştır. Linyit numunesinin özellikleri Tablo 1'de verilmiştir. Nem analizi, ASTM D 3173-03 2010 Standart Test Metoduna göre yapılmıştır [20]. Kül analizi, ASTM D 3174-04 2010 Standart Test Metoduna göre gerçekleştirilmiştir [21]. Kömürün kalorifik değeri tayini standartlara uygun olarak Leco AC-350 marka cihaz kullanılarak belirlenmiştir [22]. Kömür örneklerinin sabit karbon içerikleri ise; nem, kül ve uçucu madde içerikleri toplamının 100'den çıkarılmasıyla hesaplanmıştır. Partikül boyut analizi bir lazer kırınım ölçer (Malvern Mastersizer 2000, UK) kullanılarak yapıldı ve öğütülmüş numunelerin d_{80} boyutunun 140 μm olduğu tespit edilmiştir (Şekil 1). Toplayıcı olarak kullanılan gazyağı, yerel petrol bürosundan tedarik edildi ve gazyağının yoğunluğu 0.8 g/cm^3 olarak bulundu. Köpürtücü olarak %98 saflık derecesine sahip Metil izobütül Karbinol (MIBC- $\text{C}_6\text{H}_{14}\text{O}$) kullanılmıştır. Bu çalışmada Bandelin (Sonopuls HD 3200) marka ultrasonik cihaz kullanılmış ve cihaz 20 Khz frekansa sahiptir.

Tablo.1. Linyit örneğinin kuru bazda özellikleri

Kül (%)	Nem (%)	Sabit Karbon (%)	Kalori Değeri (MJ/kg)
28.01	24.5	16.9	14.1



Şekil 1. Öğütülmüş numunenin tane boyut dağılımı

Kolon flotasyon deneyleri ve ultrasonik işlem

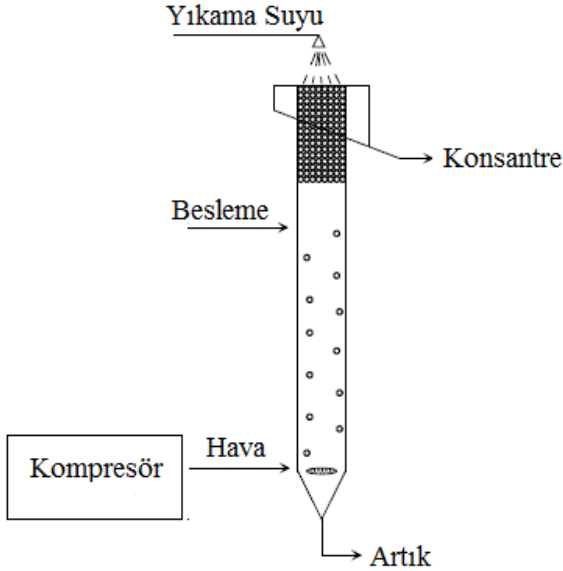
Flotasyon deneylerinin yapıldığı kolon 1 L hacminde ve 40 cm yüksekliğindedir. Kolon içerisine hava bir kompresör yardımıyla verilmekte ve verilen havanın debisi 300

³ cm³/dak'dır. Flotasyon deneyleri için süspansiyon cam silindirik bir beherde 5 g kömür numunesi ve 100 cm³ damıtılmış su kullanılarak hazırlanmıştır. Hazırlanan süspansiyon manyetik karıştırıcı ile 1000 dev/dak karıştırma hızında 3 dakika karıştırıldı. Daha sonra gazyağı yağı süspansiyona eklendi ve süspansiyon 5 dakika tekrar karıştırılarak sistem durdurulmuştur. Kolon flotasyonu hücresine köpürtücü ilave edildikten sonra hazırlanan süspansiyon sabit bir hızla kolona verilmiştir. Yüzen ürün alınarak filtre edilip, kurutulduktan ve tartıldıktan sonra yanabilir verim denklem (1) kullanılarak hesaplanmıştır.

Yanabilir verim (%)

$$= 100 \times \frac{A(100 - A_{Kül})}{B(100 - B_{Kül})} \quad (1)$$

Burada, A= Temiz kömür yüzdesi, $A_{Kül}$ = temiz kömür kül içeriği, B= besleme yüzdesi, ve $B_{Kül}$ = besleme kül içeriği



Şekil 2. Kolon flotasyonu deney düzeneği

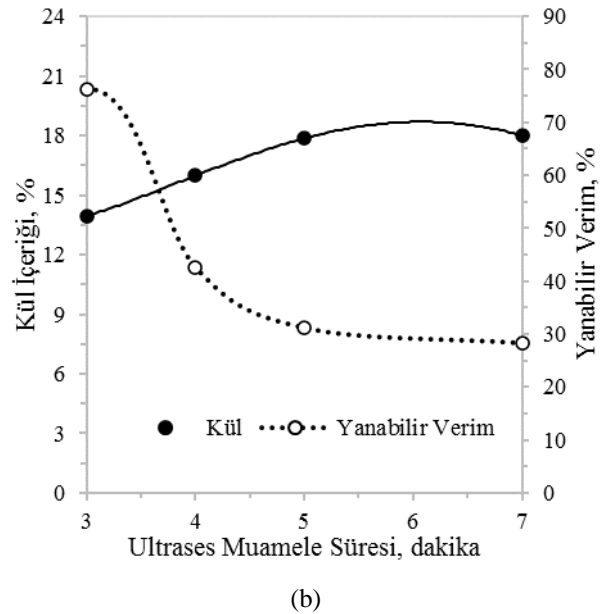
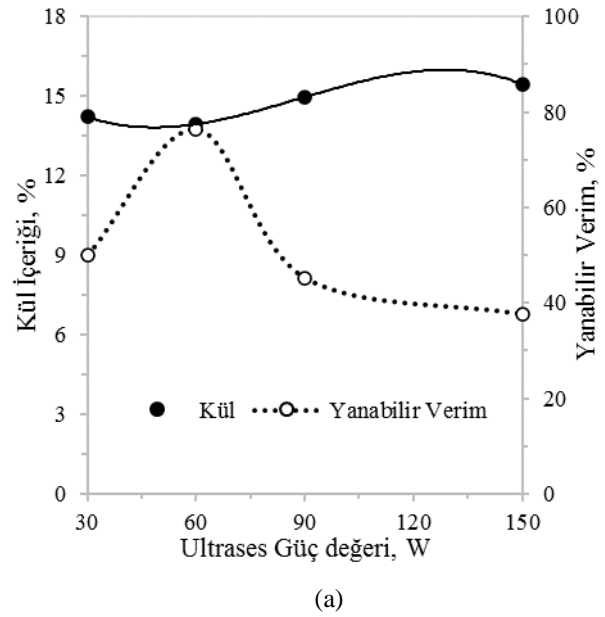
Temas açısı ölçümleri

Flotasyon deney sonucunda yüzen malzeme filtrelenip, kurutulduktan sonra 0.4 gram numune alınarak hidrolik pres yardımıyla 25 MPa basınç uygulayarak pürüzsüz yüzeyli peletlere dönüştürülmüştür. Özel bir şırınga ile katı yüzeylere bir damla su konularak ve elde edilen açı otomatik temas açısı ölçer (KSV ,CAM 101) ile ölçülmüştür.

Bulgular ve Tartışma

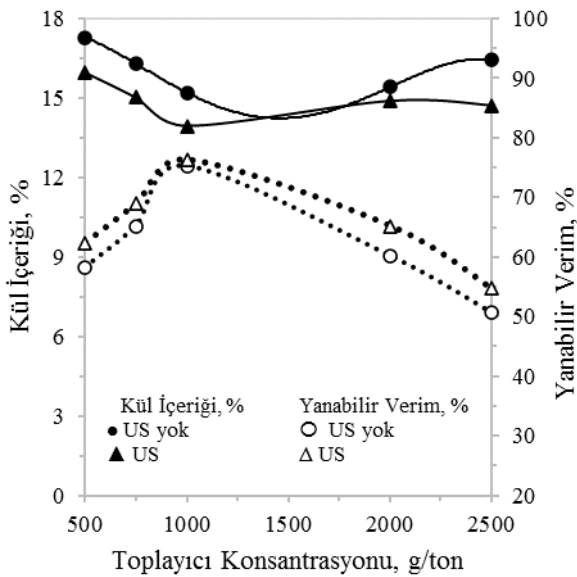
Ultrasesin güç değerleri ve muamele sürelerine bağlı olarak kömürün kül içeriği ve yanabilir verimi üzerindeki etkisi Şekil 3'de sunulmuştur. Şekil 3'a da görüldüğü gibi ultrasesin belirli bir güç değerine (60 W) kadar kömürün kül içeriği azalmakta, yanabilir verim artmaktadır, fakat daha yüksek güç değerlerinde kül içeriği değerleri artmış, yanabilir verim değerleri azalmıştır. Öte yandan, ultrases muamele süresin artması kömür kül içeriğini ve yanabilir verim değerlerini olumsuz etkilemiştir. Flotasyon üzerine

yapılan çalışmalarda da işlemin başarısının ultrases güç değerleri ve muamele süresine bağlı olarak değiştiği ifade edilmiştir [18,23-25]. Uzun süreli ultrases muamelesinin verimi azaltması, ultrasonik işlemin kömür parçacıklarını parçalaması, parçacıkların boyutlarındaki azalmaya bağlı olarak yüzey alanlarını arttırması ve bunun sonucunda kullanılan toplayıcı miktarının yetersiz kalmasına bağlanabilir. Birçok çalışmada, kömür boyutundaki azalmanın verimde bir azalmaya yol açtığını belirtilmiştir [8,26-31]. Ayrıca, özellikle korna tipli ultrasonik cihazlarının kaviteasyon kabarcıklarının çökmesi sonucu çok güçlü bir fiziksel kesme kuvveti oluşturduğu ve bu kuvvetin flotasyon işlemleri sırasında kabarcık-parçacık bağlanmasını azalttığı kaydedilmiştir [16,18,32]. En iyi sonuçlar, 60 Watt'lık bir ultrases güç değerinde ve 3 dakikalık bir işlem süresinde elde edilmiştir.



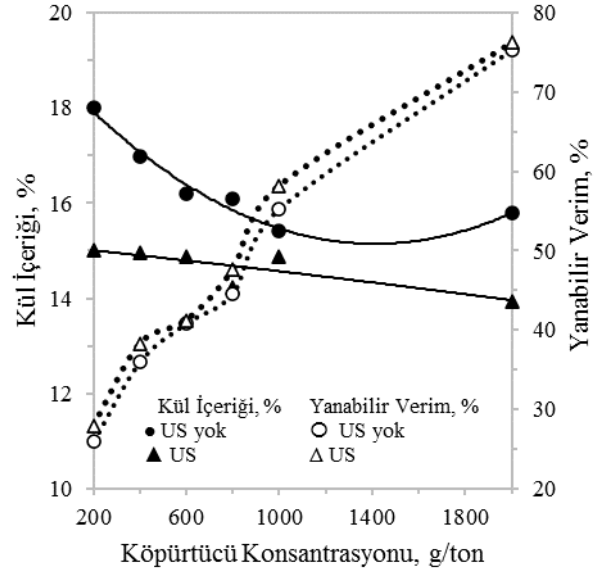
Şekil 3. Ultrasesin güç ve muamele süresine bağlı olarak kömürün kül içeriği ve yanabilir verim üzerine etkisi

Şekil 4, ultrasonik işlemin toplayıcının farklı konsantrasyonları için linyit süspansiyonunun kolon flotasyonu üzerindeki etkisini ortaya koymaktadır. Tüm deneylerde kül içeriği değerleri belirli bir gazyağı konsantrasyonuna (1000 g / ton) kadar azalmış ve ardından gazyağı konsantrasyonunun artmasıyla artmıştır. Öte yandan, ultrases işleminin kullanıldığı deneylerde de kül içeriği değerleri toplayıcı konsantrasyonuna bağlı olarak benzer şekilde değişmekle birlikte, daha düşük kül içeriği değerleri elde edilmiştir. Ultrases muamelesinin uygulandığı deneylerde kül içeriğindeki azalma ultrasonik işlemin temizleme etkisine bağlanabilir. Mao ve diğerleri (2019b), tarafından yapılan flotasyon çalışmasında da benzer sonuçlar kaydedilmiştir [14]. Bu çalışmada ultrasonik ön işlemin geleneksel flotasyona göre kül içeriğini daha fazla azalttığını belirtmişlerdir. Çelik (1989) tarafından yapılan çalışmada ultrasonik ön işlemin hidrofobik katı yüzey üzerinde temiz yüzeyler ve mikro kabarcıklar oluşturduğunu ve kabarcık-partikül bağlanmasında artışa neden olduğunu belirtmiştir. Ghadyani ve diğerleri (2018), ultrasonik ön işlemin yüksek kül içerikli kömürün flotasyon üzerindeki etkisini araştırdılar ve SEM analizi sonuçlarına göre, organik olarak zengin parçacıkların yüzeyinin, işlenmemiş numunelere kıyasla görünüşte daha temiz olduğunu göstermişlerdir [10]. Xu ve diğerleri (2017), kömür yüzeyindeki hidrofilik oksitlenmiş tabakanın, kömürün flotasyonunu ve verimini iyileştiren ultrasonik işlemin kaviteasyon etkisiyle uzaklaştırıldığını belirtmişlerdir [9]. Öte yandan, kömür süspansiyonunun yanabilir verim değerleri 1000 g/ ton toplayıcı konsantrasyonunda en yüksek değerine ulaşmış, ancak daha yüksek toplayıcı konsantrasyonlarında ise azalmıştır. Şekil 4 den görüldüğü gibi ultrases muamelesi kömür süspansiyonunun yanabilir verim değerlerini artırmıştır. Flotasyon çalışmalarında, ultrasesin ürettiği kaviteasyon etkisiyle birçok küçük kabarcıkların oluştuğu ve bu kabarcıkların flotasyon işlemine yardımcı olarak flotasyon verimliliğinde artışa neden olduğu belirtilmiştir [13-15,33,34].



Şekil 4. Ultrasonik işlemin toplayıcı konsantrasyonuna bağlı olarak kömürün kül içeriği ve yanabilir verim üzerine etkisi

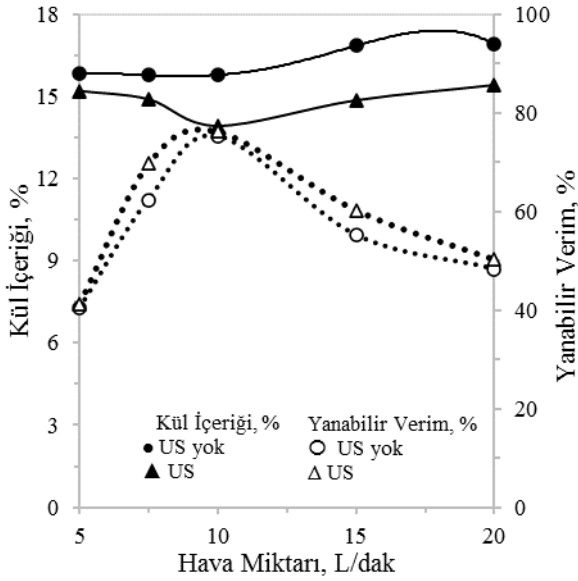
Şekil 6, ultrasonik işlemin, köpürtücü konsantrasyonunun bir fonksiyonu olarak kömür süspansiyonunun flotasyon üzerindeki etkisini göstermektedir. Klasik flotasyon deneylerinde, köpürtücü dozajına bağlı olarak kül içeriği değerleri azalmış ve yanabilir verim değerleri artmıştır. Ultrasonik işlem kullanılarak yapılan deneylerde, köpürtücü dozajının kül içeriği ve yanabilir verim değerleri üzerindeki etkisi benzerdi, ancak daha başarılı sonuçlar elde edildi. Köpürtücü konsantrasyonuna bağlı olarak ultrasonik işlemin yanabilir verimi artırması köpürtücünün süspansiyon içerisinde daha iyi dağılmasına bağlanabilir. Ultrasonik işlem uygulanan flotasyon deneylerinde flotasyon başarısındaki artış, mineral yüzeyin geçici kaviteasyon etkisi ile temizlenmesine ve dolayısıyla flotasyon reaktiflerinin süspansiyonda daha iyi dağılım sağlamasına bağlanabilir [9,10,13,14,18,19].



Şekil 5. Ultrasonik muamelesinin köpürtücü konsantrasyonuna bağlı olarak kömürün kül içeriği ve yanabilir verimi üzerine etkisi

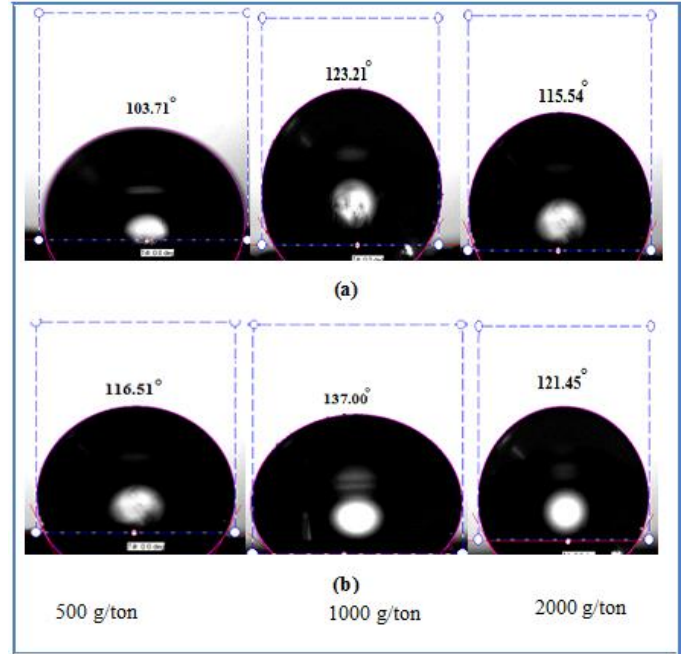
Şekil 6. Hava hızının kolon flotasyonu üzerindeki etkisini sunmaktadır. Kolon flotasyonunda, flotasyon başarısını etkileyen parametrelerden biri hava hızıdır. Şekilden görülebileceği gibi, 10 L/dak hava hızına kadar kül içeriği değerleri azalmış, yanabilir verim değerleri artmıştır. Ancak hava hızının daha yüksek seviyelere çıkarılması kül içeriğinin artmasına dolayısıyla yanabilir verimin de azalmasına yol açmıştır. Yüksek hava hızlarında yanabilir verimin azalması, kolon içerisinde fazla hava nedeniyle kabarcıkların birleşmesine ve kabarcık yüzey alanının azalmasına bağlanabilir. Literatürden, hava hızı artmasıyla verimin maksimum noktaya ulaştığı, ancak kritik bir noktadan sonra aşırı kül artması nedeniyle azaldığı bilinmektedir [35-38]. Sonuç olarak sistem için en uygun hava hızı 10 L/ dak'dır. Bu hava hızında yanabilir madde verimi en yüksek değerini almış olup, %76,25 olarak bulunmuştur. Ultrasonik işlem kullanılarak yapılan deneylerde, hava hızına bağlı olarak kül içeriği ve yanabilir verim değerleri eğrisi benzer şekilde değişim göstermekle

birlikte daha yüksek verim ve daha düşük kül içeriği değerleri elde edilmiştir.



Şekil 6. Hava hızına bağlı olarak kömürün kül içeriği ve yanabilir verimi

Şekil 7, (a) ultrasonik işlem uygulanmamış ve (b) ultrasonik işlem uygulanmış kömür süspansiyonunun farklı toplayıcı konsantrasyonu değerleri için temas açısı ölçüm sonuçlarını vermektedir. Kömür süspansiyonunun temas açısı değerleri, gazyağı konsantrasyonuna bağlı olarak artmıştır, ancak bu artış, ultrases muamelesinin uygulandığı deneylerde daha yüksek olmuştur. Şekil 7'de görüldüğü gibi, klasik deneylerde temas açısı değeri 123.21 ° iken, 1000 g/ton gazyağı konsantrasyonunda ultrasonik işlem ile 137 °'ye yükselmiştir. Benzer sonuçlar, Güngören ve diğerleri (2020), tarafından da elde edilmiş ve bu çalışmada ultrasonik işlemin belirli çalışma koşullarında temas açısını artırdığını belirtmişlerdir. Ultrasonik işlemin galen flotasyonu üzerindeki etkisi Güngören ve diğerleri (2020) tarafından araştırılmış ve 2 dakikalık kondisyonlama süresi boyunca ultrases kullanılmadan yapılan deneylerde 43° olan temas açısı değerinin kondisyonlama sırasında ultrases uygulanması ile 55 °'ye yükseldiğini kaydetmişlerdir [39]. Xu ve diğerleri (2017), oksitlenmiş kömürün temas açısının belirli bir ultrasonik ön işlem süresinin uygulanmasıyla arttığını, ancak işlem süresinin uzamasından olumsuz etkilendiğini belirtmişlerdir [9]. Ultrasonik muamele ile temas açısındaki artışın nedeni literatürde henüz ayrıntılı bir şekilde açıklanmamıştır, ancak bu artış, toplayıcı ile mineral yüzey arasında köprü oluşturan kaviteasyon kabarcıklarına bağlanabilir. Zhou ve diğerleri (2009), tarafından yapılan flotasyon çalışmasında hidrodinamik kaviteasyon ile üretilen küçük kabarcıkların katıların temas açılarını artırdığını ve oksit tabakasını çıkararak reaktif tüketimini azalttığını tespit etmişlerdir [40]. Kurşun ve Ulusoy (2015, ayrıca hidrofobik partiküllere yapışan kaviteasyon kabarcıklarının temas açısını artırarak kabarcık-partikül çarpışma verimliliğini artırdığını ve böylece flotasyon veriminde de artışa neden olduğunu belirtmişlerdir [41].



Şekil 7. Ultrases muamelesinin toplayıcı konsantrasyonuna bağlı olarak temas açısı üzerine etkisi

Sonuçlar

Bu çalışmada ultrasonik enerjisinin yüksek kül içerikli linyit kömürünün kolon flotasyonu performansı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Ultrasonik ön işlemin kolon flotasyonunda uygulanması kömürün kül içeriği değerlerini azaltmış ve yanabilir verim değerlerini artırmıştır. Ayrıca, ultrases güç değerleri ve muamele süreleri, kömürün kolon flotasyonu başarısını önemli ölçüde etkilemiş ve düşük güç değerinde kısa süreli ultrasonik işlem ile daha olumlu bir etki elde edilmiştir. Optimum gazyağı konsantrasyonunun 1000 g/ton olarak bulunmuş ve yüksek konsantrasyonlarda gazyağı kullanımını kül içeriğinde artışa ve yanabilir verimde azalmaya yol açmıştır. En düşük kül içeriği ve en yüksek yanabilir verim, 2000 g/ton köpürtücü konsantrasyonunda elde edilmiştir. Ultrasonik işlem köpürtücü ve toplayıcı konsantrasyonuna bağlı olarak flotasyon başarısını iyileştirmiştir. Bu iyileşme, ultrasonik işlemin mineral yüzeyini kaviteasyon etkisi ile temizlemesine ve dolayısıyla flotasyon reaktiflerinin aktivitesinin artmasına ve süspansiyonda daha iyi dağılmasına bağlanmıştır. Kolon flotasyonu için 10 L/dak hava hızı yeterli olmuş, ancak daha yüksek hava hızları kömür süspansiyonunun kül içeriğini artırmış ve yanabilir verim değerlerini azaltmıştır. Kömür süspansiyonunun temas açısı değerleri, toplayıcı konsantrasyonun artmasıyla artmıştır ve ultrasonik işlem ile daha yüksek temas açısı değerleri elde edilmiştir. Temas açısı ölçümleri kolon flotasyon sonuçlarını desteklemektedir.

Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Bu makalenin yazarı bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve / veya yasal-özel izin gerektirmediğini beyan etmektedir.

Yazar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir

Yazar Katkıları

Yazar makaleyi tasarladı, literatür taraması yaptı, deneysel çalışmalar ve analizler yaptı, sonuçları tartıştı ve makaleyi yazdı.

Kaynaklar

- [1] B. Yarar, "Flotation," *Ulmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*, vol B2, pp 23-28. 1988.
- [2] M.S. Celik, "Effect of ultrasonic treatment on the floatability of coal and galena", *Sep. Sci. Technol.*, vol. 24 pp.1159–1166, 1989.
- [3] T.G. Leighton, "The Acoustic Bubble", Academic Press, London, 1994.
- [4] S.G. Ozkan, and H.Z. Kuyumcu, "Investigation of mechanism of ultrasound on coal flotation", *Int. J. Miner. Process.*, vol. 81, pp. 201–203, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2006.07.011>
- [5] S.G. Ozkan, and H.Z. Kuyumcu, "Design of a flotation cell equipped with ultrasound transducers to enhance coal flotation", *Ultrason. Sonochem.*, vol. 14, pp. 639–645, 2007 <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2006.10.001>
- [6] M. Ashokkumar, "The characterization of acoustic cavitation bubbles – an overview", *Ultrason. Sonochem.*, vol. 18, pp. 864–872, 2011.
- [7] S.G. Ozkan, "Effects of simultaneous ultrasonic treatment on flotation of hard coal slimes", *Fuel*, vol. 93, pp. 576–580, 2012.
- [8] S.G. Ozkan, "Further investigations on simultaneous ultrasonic coal flotation", *Minerals*, vol. 7, p.177, 2017. <https://doi.org/10.3390/min7100177>
- [9] M. Xu, Y. Xing, X. Gui, Y. Cao, D. Wang, and L. Wang, "Effect of ultrasonic pretreatment on oxidized coal flotation", *Energy Fuels*, vol. 31, pp. 14367–14373, 2017. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.7b02115>
- [10] M. Ghadyani, S. Noaparast, and S.Z. Tonkaboni, "A study on the effects of ultrasonic irradiation as pretreatment method on high-ash coal flotation and kinetics a study on the effects of ultrasonic irradiation as pretreatment method on high-ash coal flotation and kinetics", *Int J Coal Prep Util.*, vol. 38, pp. 374-391, 2018. <https://doi.org/10.1080/19392699.2016.1277210>
- [11] Y. Peng, Y. Mao, W. Xia, and Y. Li, "Ultrasonic flotation cleaning of high-ash lignite and its mechanism", *Fuel*, vol. 220, pp. 558–566, 2018.
- [12] Y. Mao, Y. Peng, X. Bu, G. Xie, E. Wu, and W. Xia, "Effect of ultrasound on the true flotation of lignite and its entrainment behavior", *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, vol. 40, pp. 940–950, 2018.
- [13] Y. Mao, W. Xia, Y. Peng, and G. Xie, "Ultrasonic-assisted flotation of fine coal: A review", *Fuel Process. Technol.*, vol. 195, p.106150, 2019a.
- [14] Y. Mao, Y. Chen, X. Bu, and G. Xie, "Effects of 20 kHz ultrasound on coal flotation: The roles of cavitation and acoustic radiation force", *Fuel*, vol. 256, p. 115938, 2019b. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.115938>
- [15] Y. Mao, X. Bu, Y. Peng, F. Tian, and G. Xie, "Effects of simultaneous ultrasonic treatment on the separation selectivity and flotation kinetics of high-ash lignite", *Fuel*, vol. 259, p. 116270, 2020.
- [16] Y. Chen, G. Xie, J. Chang, J. Grundy, and Q. Liu, "A study of coal aggregation by standing-wave ultrasound", *Fuel*, vol. 248 pp. 38–46, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.03.030>
- [17] A.R. Videla, R. Morales, T. Saint-Jean, L. Gaete, Y. Vargas, and J.D. Miller, "Ultrasound treatment on tailings to enhance copper flotation recovery", *Miner. Eng.*, vol. 99, pp. 89–95, 2016.
- [18] Y. Chen, V.N.T. Truong, X. Bu, and G. Xie, "A review of effects and applications of ultrasound in mineral flotation", *Ultrason. Sonochem.*, vol. 60, p. 104739, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.104739>
- [19] P. Kopparthi, S. Balamurugan, and A.K. Mukherjee, "Effect of ultrasonic pre-treatment time on coal flotation". *International Journal of Coal Preparation & Utilization*, vol. 40, pp. 807-823, 2020. <https://doi.org/10.1080/19392699.2017.1417268>
- [20] ASTM D 3173–03, 2010, Standard Test Method for Moisture in the Analysis Sample of Coal and Coke, 3.
- [21] ASTM D 3174–04, 2010, Standard Test Method for Ash in the Analysis Sample of Coal and Coke from Coal, 5.
- [22] ASTM D 5865–10a, 2010, Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke, 14.
- [23] N.E. Altun, J.Y. Hwang, and C. Hicyilmaz, "Enhancement of flotation performance of oil shale cleaning by ultrasonic treatment", *Int. J. Miner. Process.*, vol. 91, pp. 1–13, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2008.10.003>
- [24] C. Gungoren, O. Ozdemir, X. Wang, S. Ozkan, and J. Miller, "Effect of ultrasound on bubble-particle interaction in quartz-amine flotation system", *Ultrason. Sonochem.*, vol. 52, pp. 446–454, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.12.023>
- [25] S.A. Hassanzadeh, S.A. Sajjadi, H. Gholami, S. Amini, and S.G. Ozkan, "An Improvement on selective separation by applying ultrasound to rougher and cleaner stages of copper flotation", *Minerals*, vol. 10, p. 619, 2020. <https://doi.org/10.3390/min10070619>
- [26] W.Z. Kang, H.X. Xun, and J.T. Chen, "Study of enhanced fine coal de-sulphurization and de-ashing by ultrasonic flotation". *Journal of China University of Mining and Technology*, vol. 17, pp. 358-362, 2007. [https://doi.org/10.1016/S1006-1266\(07\)60105-9](https://doi.org/10.1016/S1006-1266(07)60105-9)
- [27] E.Y. Yazıcı, H. Deveci, I. Alp, and T. Uslu, "Generation of hydrogen peroxide and removal of cyanide from solutions using ultrasonic waves". *Desalination*, vol. 216, pp. 209–221, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2006.12.018>
- [28] B. Ambedkar, T.N. Chintala, R. Nagarajan, and S. Jayanti, "Feasibility of using ultrasound- assisted process for sulfur and ash removal from coal". *Chem. Eng. And Process: Process Intensif*, vol. 50, pp. 236–246, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2011.02.008>
- [29] B. Ambedkar, "Ultrasonic coal-wash for de-ashing and de-sulfurization: Experimental investigation and

- mechanistic modeling”, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2012.
- [30] M.M. Royaei, E. Jorjani, and S.C. Chelgani, “Combination of microwave and ultrasonic irradiations as a pretreatment method to produce ultraclean coal”. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, vol. 32, pp. 143–155, 2012. <https://doi.org/10.1080/19392699.2012.663024>
- [31] H.X. Zhang, H.J. Bai, X.S. Dong, and Z.Z. Wang, “Enhanced desulfurizing flotation of different size fractions of high sulfur coal using sono electrochemical method”. *Fuel Processing Technology*, vol. 97, pp. 9–14, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2012.01.005>
- [32] Q. Cao, J. Cheng, Q. Feng, S. Wen, and B. Luo, “Surface cleaning and oxidative effects of ultrasonication on the flotation of oxidized pyrite”, *Powder Technol.*, vol. 311, pp. 390–397, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.01.069>
- [33] K. Yasuda, H. Matsushima, and Y. Asakura, “Generation and reduction of bulk nanobubbles by ultrasonic irradiation”. *Chemical Engineering Science*, vol. 195, pp. 455–461, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2018.09.044>
- [34] H. Wang, W. Yang, X. Yan, L. Wang, Y. Wang, and H. Zhang, “Regulation of bubble size in flotation: A review”. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 8, p. 104070, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104070>
- [35] J.A. Finch, and G.S. Dobby, “Column flotation”, Pergamon Pres, Oxford. 1990.
- [36] D. Tao, G.H. Luttrell, and R.H. Yoon, “A parametric study of froth stability and its effect on column flotation of fine particles”, *International Journal of Mineral Processing*, vol.59, pp.25-43, 2000.
- [37] H. Sutcu, T. Toroglu, and O. Dalahmetoglu, “Recovery of coal from waste fines by column flotation”, *Journal of Solid Waste Technology and Management*, vol.29, No.3, pp.168-178, 2003.
- [38] H. Hacifazlıoğlu, and H. Sutcu, “Optimization of some parameters in column flotation a comparison of conventional cell and column cell in terms of flotation performance”, *Journal of The Chinese Institute of Chemical Engineers*, vol.38, pp.287- 293i 2007.
- [39] C. Gungoren, Y. Baktarhan, I. Demir, and S.G. Ozkan. “Enhancement of galena-potassium ethyl xanthate flotation system by low power ultrasound”, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, vol. 30, pp. 1102–1110, 2020. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(20\)65281-5](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(20)65281-5)
- [40] Z.A. Zhou, Z. Xu, J.A. Finch, J.H. Masliyah, and R.S. Chow, “On the role of cavitation in particle collection in flotation – A critical review”. II, *Miner. Eng.*, vol. 22, pp. 419–433, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2008.12.010>
- [41] H. Kursun, and U. Ulusoy, “Zinc recovery from a lead–zinc–copper ore by ultrasonically assisted column flotation”, *Particul. Sci. Technol.*, vol. 33, pp. 349–356, 2015. <https://doi.org/10.1080/02726351.2014.970314>



Araştırma Makalesi / Research Article

İyon Baskılı Polimer Kullanılarak Bastnazit Cevherinden Seryumun Seçici Olarak Ayrılması

Selective Separation of Cerium from Bastnasite Ore Using Ion Imprinted Polymer

İbrahim Dolak

¹Dicle Üniversitesi, Diyarbakır Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Kimya Teknolojileri Bölümü, idualak@dicle.edu.trORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2095-7614>

MAKALE BİLGİLERİ

Makale geçmişi:

Geliş: 3 Nisan 2023
Düzeltilme: 17 Nisan 2023
Kabul: 17 Nisan 2023
Online: 20 Haziran 2023

Anahtar kelimeler:

İyon Baskılı Polimer,
Malzeme Bilimi,
Seçici Ayırma
Metalurji

ÖZ

Bu çalışma, Ce(III) baskılı (IIP) ve baskısız (NIP) polimerler kullanılarak çeşitli lantanid iyonlarının varlığında cevher bünyesinde bulunan ve liç işlemi ile çözelti ortamına alınmış Ce(III) iyonunun çözelti ortamından seçici olarak ayrılması amacıyla yapılmıştır. Bu amaçla kullanılan İyon baskılı polimer (IIP) ve baskısız polimer (NIP) süspansiyon polimerizasyonu tekniği ile hazırlanmıştır. Polimer sentezinde Fonksiyonel monomer olarak N-metakriolilamido folik asit (MAFol) kullanılmıştır. Hazırlanan fonksiyonel monomer, kompleks monomer, baskılı ve baskısız polimerlerin karakterizasyon işlemleri yapılmış bu sayede beklenen yapısal değişiklikler desteklenmiştir. Optimum deney koşullarını belirlemek amacıyla pH, temas süresi ve başlangıç Ce(III) konsantrasyonu gibi farklı değişkenlerin bağlanma özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmış olup elde edilen optimum koşullarda; pH 5-6 aralığında ve ideal temas süresi 15 dakika olduğu tespit edilmiş olup, bu koşullarda Ce(III) baskılı polimerin ve baskısız polimerin Ce(III) bağlama verimleri sırasıyla 24,4 mg Ce(III) g⁻¹ polimer ve 3,0 mg Ce(III) g⁻¹ polimer olarak tespit edilmiştir. Ce(III)'ün cevher bünyesinde bulunan Th(IV), La(III) ve Eu(III) iyonlarının varlığında bağlanma çalışmaları da Ce(III) baskılı polimerler kullanılarak gerçekleştirilmiş olup baskılanmış polimer, Ce(III) iyonlarına karşı yüksek seçicilik sergilemiştir. Rekabetçi koşullar altında tespit edilen bağlanma sırasının Ce(III) > La(III) > Th(IV) > Eu(III) olduğu yapılan deneyler neticesinde tespit edilmiştir.

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 03 April 2023
Revised: 17 April 2023
Accepted: 17 April 2023
Available Online: 20 June 2023

Keywords:

Ion Imprinted Polymer,
Material Science,
Selective Separation,
Metallurgy

Doi: 10.24012/dumf.1275872

* Sorumlu yazar / Correspondence

ABSTRACT

This study was carried out with the aim of selectively separating Ce(III) ion from the solution medium in the presence of various lanthanide ions by using Ce(III) imprinted (IIP) and non-imprinted (NIP) polymers. Ion imprinted polymer (IIP) and non-imprinted polymer (NIP) used for this purpose were prepared by suspension polymerization technique. N-methacryloylamido folic acid (MAFol) was used as a functional monomer in the synthesis of the polymer. The characterization processes of the prepared functional monomers, complex monomers, imprinted and non-imprinted polymers were carried out and the expected structural changes were supported. In order to determine the optimum experimental conditions, the effects of different variables such as pH, contact time and initial Ce(III) concentration on the bonding properties were investigated. It has been determined that the ideal contact time is in the pH 5-6 range and the ideal contact time is 15 minutes, and the Ce(III) binding yields of the Ce(III) imprinted polymer and the non-imprinted polymer are 24.4 mg Ce(III) g⁻¹ polymer and 3.0 mg Ce(III) g⁻¹ polymer respectively. Binding studies of Ce(III) in the presence of Th(IV), La(III) and Eu(III) ions in the ore were also carried out using Ce(III) imprinted polymers, and the imprinted polymer exhibited high selectivity towards Ce(III) ions. It was determined as a result of experiments that the binding order determined under competitive conditions was Ce(III) > La(III) > Th(IV) > Eu(III).

Giriş

Süper iletkenler, ikincil piller, manyetik ve lüminesans özellikli malzemelerin yapımında mikro katkı maddeleri olarak ve lazer malzemelerinin yapımında kullanıldıklarından dolayı seryum gibi nadir toprak elementlerinin analitiksel metodlarla zenginleştirilmeleri son yıllarda bu yönde yapılan bilimsel çalışmaların ilgi odağı olmuştur [1,2]

Seryum ve diğer nadir toprak elementlerinin buldukları matrix ortamından seçici bir şekilde ayrılmaları ve zenginleştirilmeleri için çeşitli ekstraksiyon metodları, ekstraksiyon ve kromatografik metodlar kullanılmıştır [3-10]. Ancak uzun yıllardan beri kullanılan bu geleneksel yöntemlerin yüksek çözücü ve enerji tüketimi ve düşük seçicilik gibi önemli dezavantajları vardır. Bu nedenle, daha yüksek seçiciliğe, daha az işlem adımına ve daha düşük zaman ve enerji gereksinimlerine sahip yenilikçi teknolojilere ve işlemlere ihtiyaç vardır.

İyon ve molekül baskılama teknolojisi hedef molekül ya da iyonun üç boyutlu (3D) şekline ve işlevlerine uyarlanmış gözenekli polimerik yapıda bağlayıcı gruplara sahip olan oldukça yüksek seçiciliğe sahip malzemelerin sentezi için kullanılan bir yöntemdir [11,12]. İyon/molekül baskılama sürecinde, bir polimerik adsorbanın seçiciliği, fonksiyonel monomerin özgülüne, koordinasyon geometrisine, hedef iyon ve moleküllerin koordinasyon sayısına, varsa yüklerine ve tanecik boyutlarına bağlıdır [13-21]. Son yıllarda, eser düzeydeki metal ve nadir toprak iyonlarının iyon baskılı polimerler (IIP'ler) kullanılarak seçici olarak ayrılmaları ve zenginleştirilmeleri oldukça önemli bir analitiksel ayırma konusu haline gelmiştir [22-30].

Bu çalışmada, Ce(III) iyonlarının bastnazit cevherinden ve sulu çözeltilerden seçici olarak ayrılması için iyon baskılı polimer (IIP) sentezlenmiştir. Bu amaçla sentezlenen polimerde fonksiyonel monomer olarak N-metakrilamido folik asit (MAFol) ve çapraz bağlayıcı olarak da etilen glikol dimetakrilat (EDMA) kullanılmıştır. Hazırlanan Ce(III) baskılı (IIP) ve baskısız (NIP) polimerlerin yapısal karakterizasyonları (FT-IR, SEM, EDX)

gerçekleştirilmiş ve cevher bünyesinden çözültü ortamına alınmış Ce(III) iyonlarının seçici olarak bağlanma davranışları analiz edilmiş ve oldukça başarılı ayırma sonuçları elde edilmiştir.

Materyal ve Metod

Çalışmada, kullanılan kimyasallar Sigma Aldrich marka Folik asit, $Ce(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$, $La(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$, $Eu(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$, $Th(NO_3)_4$, benzotriazol, poli(vinilalkol) (PVA) (MW 27000), 2,2'-azobis (izobütironitril) (AIBN), etilen glikol dimetakrilat (EDMA) ve HPLC dereceli çözücüler kullanılmıştır.

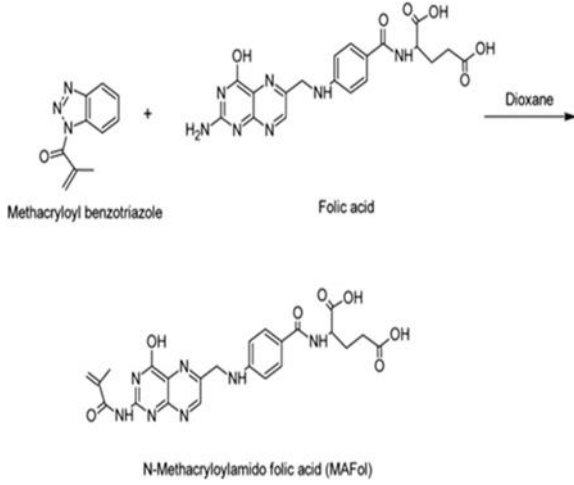
Karakterizasyon çalışmalarında Fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopisi (FT-IR) analizleri Perkin-Elmer Model Spectrum 400 spektrometresi ile, sentezlenen polimerlerin spesifik yüzey alanı analizleri Nova 2200 Model yüzey alanı ve gözenek boyutu analiz cihazı ile, Taramalı elektron mikroskopu (SEM) görüntüleri ve EDX bileşen analizleri ise FEI Quanta marka FEG 250 SCE model cihaz kullanılarak yapılmıştır.

Ce(III) ve diğer nadir toprak elementlerinin analizleri Agilent 7700 Serisi indüktif olarak eşleşmiş plazma-kütle spektroskopisi (ICP-MS) sistemi kullanılarak yapılmıştır. Cihazın çalışma koşulları RF gücü = 1600 W, örnekleme derinliği = 6 mm, analiz cihazı basınç = $5,47 \times 10^{-5}$ Pa, çarpışma hücreesindeki helyum akışı = 4,99 mLmin⁻¹ ve plazma sıcaklığı = 9876 K olacak şekilde ayarlanmıştır. Bütün analizler % 95 güven seviyesinde 3 defa tekrar edilmiştir.

Fonksiyonel Monomer (N-methacryloylamido Folic Acid (MAFol)) Sentezi

Fonksiyonel monomer olarak kullanılan N-methacryloylamido Folic Acid (MAFol, aşağıda açıklandığı gibi daha önce literatürde kaydedilen yöntem [28] göre hazırlanmıştır. Folik asit 1 m mol olacak şekilde 50 mL deiyonize su içinde çözüldü. Çözelti ortamında anyonik formda folat iyonları elde etmek için ortam pH'ı 1 M NaOH ile 9-10'a ayarlandı. Daha sonra bu çözeltiye dioksan içerisinde çözülmüş metakrilolil benzotriazol çözeltilerinden stokiyometrik oranda ilave edildi. Oluşan karışım oda oda sıcaklığında 30 dakika karıştırıldı ve reaksiyonun tamamlanması, ince tabaka kromatografisi

(TLC) ile izlendi. Reaksiyon sona erdikten sonra çözücü olarak kullanılan dioksan vakum altında buharlaştırılarak uzaklaştırıldı. Reaksiyonun sonunda sulu fazın pH'ını 5–6'ya ayarlamak için 0.1 M HCl ilave edildi ve son olarak sulu faz, %85 verimle sarı bir mikro kristal olan MAFol monomerini elde etmek için vakum altında buharlaştırıldı. MAFol fonksiyonel monomerinin sentezi Şekil 1'de şematik olarak verilmiştir.



Şekil 1. Fonksiyonel Monomer (*N*-methacryloylamido Folic Acid (MAFol)) Sentezi

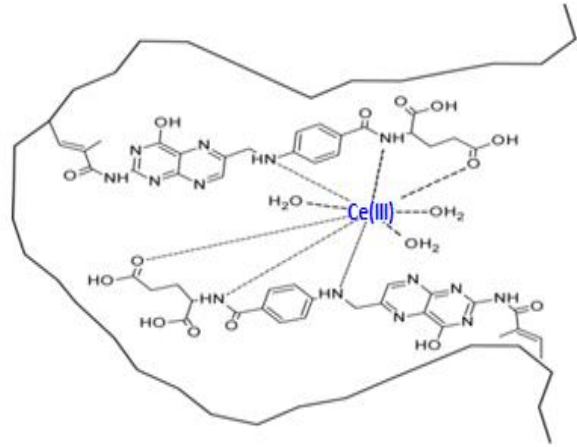
MaFol-Ce(III) Kompleks Monomerinin Hazırlanması

Kompleks monomer olarak kullanılan MAFol–Ce(III) sentezi için MAFol (0.50 g, 2.0 mmol), 15 mL kloroform içinde çözüldü. Daha sonra bu çözeltiliye yavaş yavaş $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (0.22 g, 1.0 mmol) ilave edildi ve oda sıcaklığında 24 saat karışması sağlandı. Sentezlenen kompleks monomer süzüldü, etanol ile yıkandı ve 24 saat 50°C 'de vakumlu bir fırında kurutuldu.

Ce(III) Baskılı Polimerin Hazırlanması

Ce(III) baskılı polimer aşağıda açıklandığı gibi süspansiyon polimerizasyon tekniği kullanılarak hazırlanmıştır [28]. Bu amaçla öncelikli olarak 0.2 g poli(vinil alkol) (PVA) 50 mL deiyonize su içinde çözülerek sulu dispersiyon ortamı hazırlandı. Daha sonra önceden hazırlanmış MAFol–Ce(III) kompleks monomeri 5,0 mL dimetil sülfoksit (DMSO) içinde çözüldü ve bu çözelti EDMA/toluen (2,0 mL/10,0 mL) karışımı ile birlikte karıştırıldı ve son olarak reaksiyon ortamına başlatıcı olarak 30 mg AIBN ilave

edildi. Hazırlanan çözelti cam polimerizasyon reaktörüne yerleştirilmiş dispersiyon ortamına aktarıldı ve öncelikli olarak 5 dakika azot gazı ile temizlendi. Polimerizasyon reaktörü önce 70°C 'de sıcaklıktaki termostatlı bir su banyosuna daldırılarak 6 saat boyunca 600 rpm sabit karıştırma hızında karıştırıldı. Daha sonra sıcaklık 90°C 'ye yükseltilerek 3 saat süresince karıştırma işlemi devam ettirildi. Polimerizasyon işleminin sona ermesinden sonra reaksiyona girmemiş başlatıcı, monomer, çapraz bağlayıcı, diğer reaktif ve çözeltileri ortamdan uzaklaştırmak amacıyla etanol-deiyonize su karışımı ile birkaç defa yıkandı. Polimerin içerisine baskılanmış Ce(III)'un polimer yapısından uzaklaştırılması amacıyla 5 M HNO_3 ile 24 saat etkileştirildi ve bu işlem sonucunda sadece Ce(III) iyonuna özgü bağlanma bölgeleri oluşturuldu. Hazırlanan Ce(III) baskılı polimerin şematik gösterimi Şekil 2'de verilmiştir. Çalışmalarda tüm deneylerde baskılanmanın avantajını göstermek amacıyla kullanılacak olan baskısız polimerin (NIP) sentezi de aynı teknik ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2. Ce(III) Baskılı Polimerin Şematik Gösterimi

Karakterizasyon Çalışmaları

Hazırlanan Ce(III) baskılı ve baskısız polimerler FT-IR, SEM, EDX ve şişme testleri ile karakterizasyon çalışmaları yapıldı.

Polimerlerin FT-IR spektrumları için, kuru polimer partikülleri (yaklaşık 10 mg) KBr

(yaklaşık 100 mg) ile karıştırıldı ve pellet tekniği ile tablet formuna preslendi ve ardından spektrumları alındı.

Polimerlerin SEM analizi için, iletkenlik sağlamak ve ışın hasarından korumak için altın nanopartikülleri ile kaplandı ve hazırlanan polimer partikülleri platin yüzey üzerinde biriktirildi. Daha sonra 5000 kat ve 13000 kat büyütme ile elde edilmiş SEM görüntüleri çekildi.

Polimerlerin su ile şişme davranışları bağlama performansları için önemli bir parametredir ve bu nedenle hazırlanan polimerlerin şişme davranışları değerlendirilmiştir. Polimerlerin şişme davranışını değerlendirmek için, NMR tüpleri 1 cm'ye kadar kuru polimer ile dolduruldu ve polimer partiküllerinin 2 saat distile suda dengelenmesi sağlandı. Daha sonra şişme oranı

$$\text{Şişme Oranı (\%)} = \frac{V_{\text{şişmiş}} - V_{\text{kuru}}}{V_{\text{kuru}}} \quad (1)$$

formülü ile hesaplanmıştır.

Optimizasyon Çalışmaları (Temas Süresi, pH, Başlangıç Ce(III) Derişimi Etkisi)

pH'nın Ce(III) iyonlarının baskılı ve baskısız polimere bağlanma üzerindeki etkisini incelemek amacıyla her bir polimerden (IIP ve NIP) 25'er mg alınıp pH 2-9 arasında çözeltilerde hazırlanmış 10 ppm Ce(III) çözeltileri ilave edilmiştir. Hazırlanan bu çözelti 30 dk etkileştirildikten sonra her karışımdan 1 mL'lik çözelti alındı ve ICP-MS ile analiz edilmiştir.

Temas süresinin bağlanma verimine etkisini incelemek amacıyla belirlenen optimum pH'da 25'er mg polimerler ile 2 mL 10 ppm Ce(III) çözeltisi ilave edilip 5, 10, 15, 20, 25 ve 30 dakikalarda karışımlardan 1'er mL'lik örnekler alınıp ICP-MS ile analiz edilmiştir.

Başlangıç Ce(III) derişimin etkisini incelemek amacıyla 10 mM NH₄Ac (pH: 5,5) tamponları içerisinde hazırlanmış farklı derişimlerdeki, Ce(III) çözeltileri ile 25'er mg polimerler etkileştirilmiş ve 15. dakikanın sonunda her bir çözeltiden 1'er mL'lik örnekler alınarak ICP-MS ile analiz edilmiştir.

Tekrar Bağlanabilme Çalışmaları

Hazırlanan Ce(III) baskılı polimerin tekrar tekrar kullanımını belirlemek amacıyla yapılan deneylerde, 25 mg baskılı polimer alınmış tespit edilen optimum koşullarda ayrı ayrı Ce(III) çözeltileri ile en az 10 kez etkileştirilmiş ve bağlanma verimlerinde azalma yada değişiklik olup olmadığı araştırılmıştır.

Seçicilik Çalışmaları

Ce(III) baskılı polimerin Ce(III) iyonuna seçiciliğine yönelik yapılan deneylerde, Ce(III)-La(III), Ce(III)-Th(IV) ve Ce(III)-Eu(III) ayrı ayrı ikili karışımları belirlenen optimum koşullar altında 25'er mg'lık polimerlere ilave edilmiş ve işlem sonunda her bir çözeltiden 1'er mL alınmış ICP-MS ile analiz edilmiştir.

Ce(III) iyonunun baskılı polimer ve sulu çözelti arasındaki dağılım katsayısı, aşağıdaki denklem kullanılarak belirlenmiştir:

$$K_d = (C_b - C_s / C_s) \times (V/m) \quad (2)$$

denklemden K_d dağılım katsayısı olup C_b ve C_s sırasıyla başlangıç ve son çözelti konsantrasyonlarıdır. denklemden V çözeltinin ml türünden hacmi olup, m ise baskılı polimerin gram olarak kütlesidir.

Gerçek örneklerde Ce(III) iyonu ile birlikte bulunabilecek iyonların varlığında Potansiyel olarak karışan iyonların varlığında seçicilik katsayısı (k) ve baskılı polimerin baskısız polimere göre seçicilik katsayısı (k') olarak gösterirsek;

$$k = K_{\text{Ce(III)}} / K_{\text{(karıştırıcıiyon)}} \quad (3)$$

$$k' = K_{\text{(IIP)}} / K_{\text{(NIP)}} \quad (4)$$

denklemden 3'teki K_{(Ce(III))} Ce(III) iyonunun dağılım oranı ve K_(karıştırıcıiyon), ise ortamda bulunabilecek yabancı iyonların dağılım oranıdır.

Bastnazit Cevherinde Bulunan Ce(III)'un Seçici olarak Ayrılması

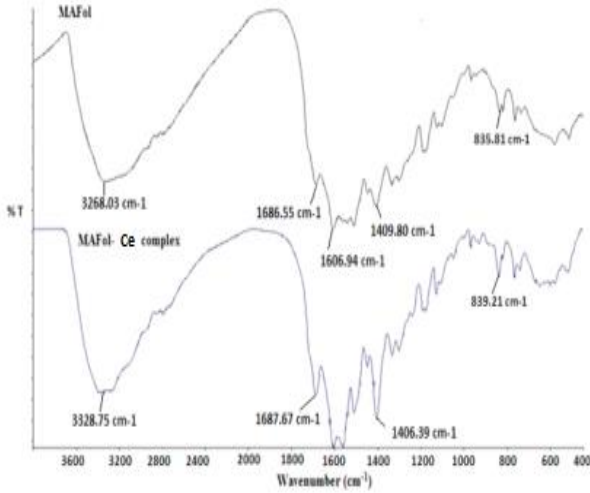
Bastnazit cevherinde bulunan Ce(III) iyonunun hazırlanan baskılı ve baskısız polimerler ile cevher bünyesinde bulunan diğer lantanidlerin

varlığında tespit edilen optimum koşullarda bağlanma verimlerini incelemek amacıyla yapılan deneylerde, öncelikli olarak cevher numunesinden 1 g alınmış ve derişik HNO₃ ve H₂SO₄ kullanılarak mikrodalga destekli liçi yapılmıştır. Liçi işleminden sonra çözelti ortamına alınan Ce(III) ve diğer lantanid çözeltisi ph'ı 5,5'e ayarlanmış ve saf su ile 100 ml'ye tamamlanmıştır. Hazırlanan bu liçi çözeltisi ile tespit edilen optimum koşullarda baskılı ve baskısız polimerler etkileştirilmiş işlem sonunda alınan örnekler ICP-MS ile analiz edilmiştir.

Deneyel Bulgular

Karakterizasyon çalışmaları

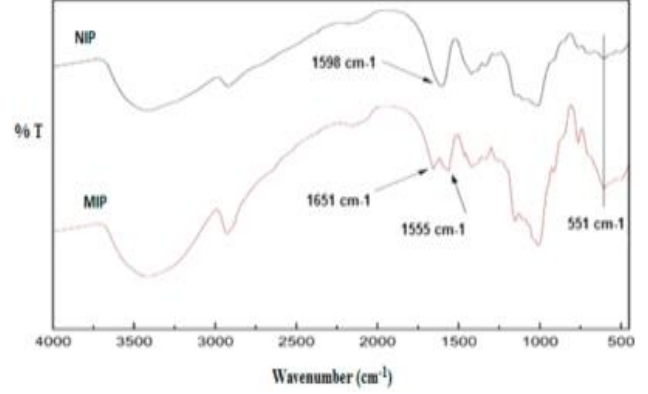
Sentezlenen fonksiyonel monomer (MaFol) ve kompleks monomer (MAFol-Ce(III)) karakterizasyon çalışmalarında FT-IR spektroskopisi kullanıldı. Şekil 3'te görüldüğü üzere MAFol monomerinin O-H esnemesi (~3228 cm⁻¹), COO- grubu esnemesi (~1690 cm⁻¹), N-H esnemesi (1606 ve 1510 cm⁻¹) ve C-H bükülmeleri nedeniyle ana karakteristik absorpsiyon bantları (1406 ve 1334 cm⁻¹) gözlemlendi.



Şekil 3. Fonksiyonel Monomer ve Kompleks Monomerin FT-IR Spektrumları

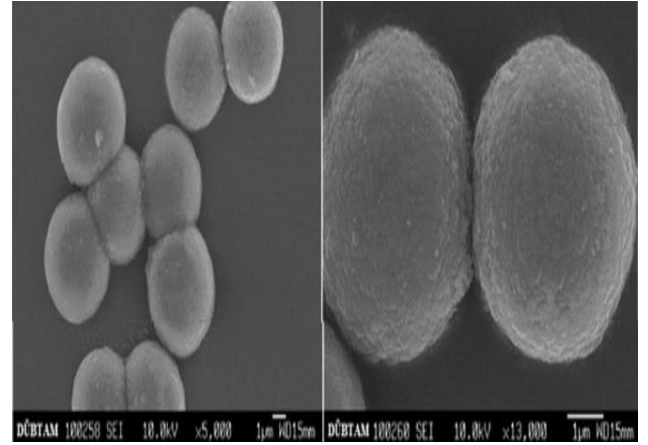
Hazırlanan Ce(III) baskılı polimerin ve baskılanmamış polimerin karakterizasyonları da FT-IR spektroskopisi kullanılarak yapıldı. Şekil 4'te görüldüğü üzere polimerlerin omurga yapıları benzer olduğu için birbirine çok yakın FT-IR spektrumları gözlemlendi. FT-IR spektrumlarında çapraz bağlayıcıdan kaynaklı fonksiyonel monomerden COO- grubu esnemesi (~1650 cm⁻¹), C-H esnemesi (~2900 cm⁻¹) ve C-O esnemesi

(~1000 cm⁻¹) gibi absorpsiyon pikleri gözlenmekle birlikte yapıya Ce(III) iyonu girmesi ile 1650 cm⁻¹'deki absorpsiyon pikinde kompleksleşmeden kaynaklı çatallaşma ve diğer pik bölgelerinde düşük miktarda kaymalar gözlemlendi.



Şekil 4. Baskılı (MIP) ve Baskısız (NIP) Polimerin FT-IR Spektrumları

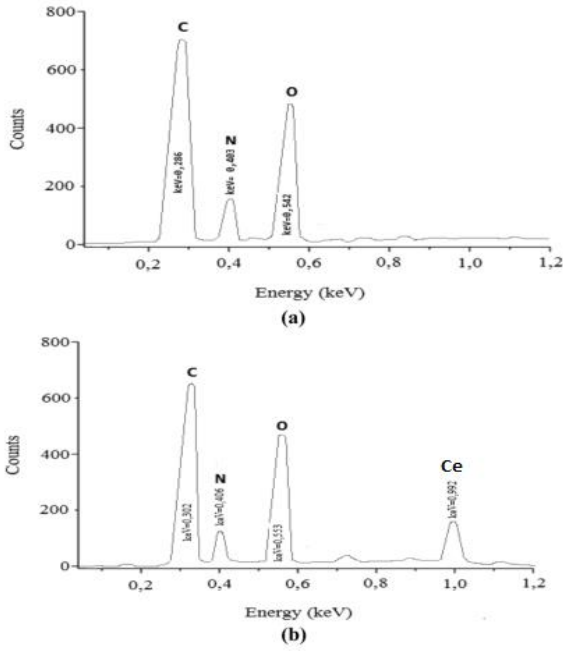
Ce(III) baskılı polimerlerin 5000 kat ve 13000 kat oranında büyütülmüş SEM görüntüleri Şekil 5'te verilmiştir. SEM görüntülerinden de görüldüğü üzere sentezlenen polimerik taneciklerin küresel yapıda ve gözenekli oldukları tespit edilmiştir.



Şekil 5. Ce(III) Baskılı Polimerin SEM Görüntüleri (a) 5000 kat büyütülmüş (b) 13000 kat büyütülmüş

Ce(III) baskılı ve baskısız polimerlerin temel bileşimlerini belirlemek amacıyla enerji dağılımlı X-ışını analizi (EDX) spektrumları alınmış EDX spektrumları Şekil 6'da verilmiştir. Şekil 6(a)'daki EDX spektrumunda görüldüğü üzere baskısız polimerin metal bölgesinde pik olmadığı, buna karşın şekil 6(b)'deki Ce(III) baskılı polimerin EDX spektrumunda metal bölgesinde pik meydana geldiği ve polimerik

yapıya Ce(III) iyonunun bağlandığını açıkça göstermektedir.



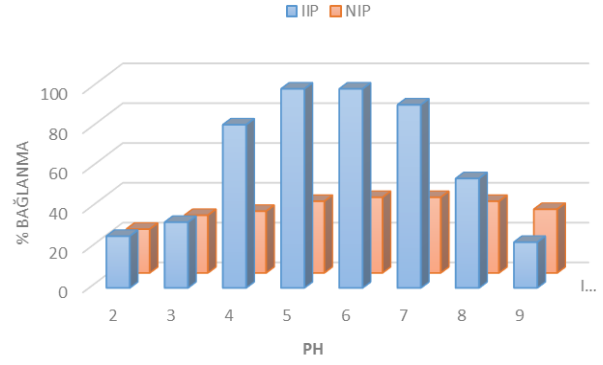
Şekil 6. Baskılı (IIP) ve Baskısız (NIP) Polimerlerin EDX Spektrumları

Hazırlanan baskılı ve baskısız polimerlerin şişme deneyleri distile saf su kullanılarak NMR tüpleri içerisinde gerçekleştirilmiş olup Ce(III) baskılı polimerin ve baskısız polimerin denge şişme oranları sırasıyla %44.7 ve %21.4' olarak tespit edilmiştir.

Ce(III) Bağlanmasında Optimum Koşulların Belirlenmesi

(a) Optimum pH Tespiti

Çözelti ortamından metal iyonlarının bağlanmasını etkileyen en önemli parametrelerden biri pH faktörüdür. pH faktörü yani ortamın hidrojen iyonu derişimi metal iyonlarının ortamdaki çözünürlüğünü ve polimer yapı üzerindeki fonksiyonel grupları içeren bağlanma bölgelerinin iyonizasyon durumunu etkileyebilir. Yapılan deneylerde uygun asit, baz ve tampon çözeltiler kullanılarak çözelti ortamındaki pH değerleri 2.0–9.0 aralığına getirilerek değişen pH değerlerine bağlı olarak Ce(III) iyonlarının polimerik yapıya bağlanma verimlerinin değişimi incelenmiş ve elde edilen sonuçlar Şekil 7'de verilmiştir. Şekilden 7'de görüldüğü üzere Ce(III) maksimum bağlanma veriminin pH 5.0–6.0 pH aralığında olduğu tespit edilmiştir.

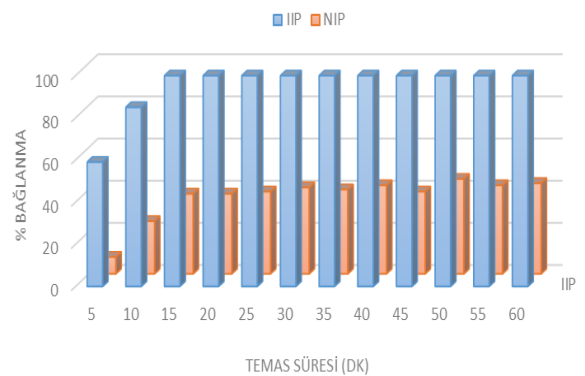


Şekil 7. Ce(III) Bağlanma Verimine pH Etkisi

Şekil 7'den de görüldüğü üzere düşük pH'da bağlanma veriminin düşük olması ortamdaki pozitif yüklü hidrojen iyonu derişiminin yüksek olması ile polimerdeki bağlanma bölgelerini protonlaması ile açıklanabilir. Yüksek pH'da ise bağlanma veriminde meydana gelen azalma ise yüksek pH'larda ortamda meydana gelen OH⁻ ve O²⁻ iyonlarından dolayı Ce(III) iyonlarının oksit ve hidroksi formlarına dönüşüp polimerik yüzeye bağlanma isteğini kaybetmesi ile açıklanabilir.

(b) Optimum Temas Süresi Etkisi

Temas süresinin Ce(III) bağlanması üzerine etkisini incelemek amacıyla yapılan deneylerde 25'er mg baskılı ve baskısız polimerlerin bulunduğu ortamlara 2 ml 10 ppm Ce(III) çözeltileri ilave edilmiş 5, 10, 15, 20, 25 ve 30 dk'larda deney ortamından çözeltiler alınarak ICP-MS cihazında analizleri yapılmış ve bağlanma için yeterli olan süre tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar şekil 8'de verilmiştir.

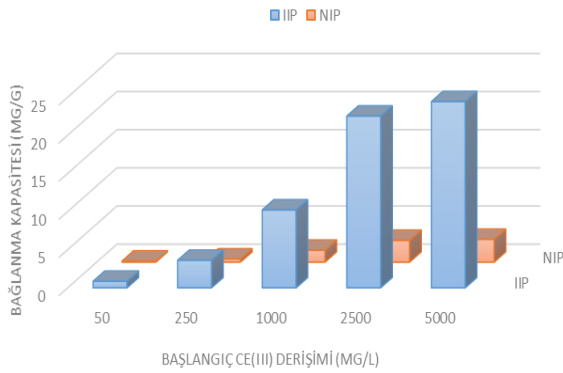


Şekil 8. Ce(III) Bağlanma Verimine Süre Etkisi

Şekil 8’de görüldüğü üzere Ce(III) baskılı polimerin oldukça hızlı bir şekilde Ce(III) iyonlarını bağladığı ve çözelti ortamındaki Ce(III) iyonlarının tamamının bağlanması için 15 dk’lık bir sürenin yeterli olduğu tespit edilirken tespit edilirken, aynı bağlanma etkinliği baskılanmamış polimerde görülmediği tespit edilmiştir.

(c) Başlangıç Ce(III) Derişimi ve Bağlanma Kapasitesi Tespiti

Ce(III) derişimine bağlı olarak tespit edilen optimum pH ve sürede bağlanma kapasitelerini belirlemek amacıyla yapılan deneylerde aynı miktar baskılı ve baskısız polimer üzerine farklı derişimlerde Ce(III) çözeltileri ilave edilmiş ve etkileştirilmiştir. İşlem sonunda geriye kalan Ce(III) analizleri ICP-MS ile yapılmış ve elde edilen sonuçlar şekil 9’da verilmiştir.



Şekil 9. Ce(III) Bağlanma Verimine Derişim Etkisi

Şekil 9’dan da görüldüğü üzere iyon baskılı polimerin bağlanma etkinliği 2000 ppm düzeyindeki Ce(III) derişiminde sabitlenmeye başladığı tespit edilmiş olup yapılan stokiyometrik hesaplamalar sonucu baskılı polimerin maksimum bağlama kapasitesinin 24,4 mg Ce(III) g⁻¹ polimer olduğu tespit edilmiştir. Aynı koşullarda baskılanmamış polimerin maksimum bağlama kapasitesi ise 3,1 mg Ce(III) g⁻¹ polimer olduğu tespit edilmiştir. Elde edilen bu sonuç baskılanmış polimerin avantajını açık bir şekilde ortaya koymaktadır.

Seçicilik Çalışmaları

Hazırlanan baskılı ve baskısız polimerler ile çözelti ortamında bulunan Ce(III) iyonunun yanında bulunabilecek diğer nadir toprak elementlerinin yanında seçici olarak bağlanma koşullarını incelemek amacıyla yapılan

çalışmalarda Ce(III)–La(III), Ce(III)–Th(IV) ve Ce(III)–Eu(III) şeklinde hazırlanmış 2’li karışımlar belirlenen optimum koşullarda polimerler ile etkileştirildi. Elde edilen sonuçlar Tablo 1’de verilmiştir.

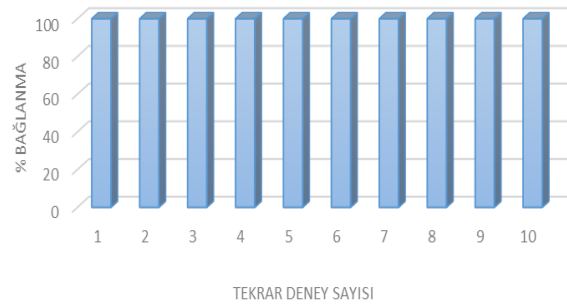
Tablo 1. Ce(III), La(III), Th(IV) ve Eu(III) iyonlarının baskılı (IIP) ve baskısız (NIP) polimerler ile bağlanmasında hesaplanan Dağılım Katsayısı (K_D), Seçicilik Katsayısı (k) ve Bağlı Seçicilik Katsayısı (k') Değerleri

İyon	% Binding		K_D (mL/g)		k	
	IIP	NIP	IIP	NIP	IIP	NIP
Ce(III)	≥99,9	37,8	8340,0	42,9		
La(III)	22,4	33,4	26,4	26,7	246,6	0,73
Th(IV)	18,5	37,6	21,5	23,4	301,5	0,81
Eu(III)	15,5	35,8	18,7	20,0	274,0	0,87

Tablo 1’den de görüldüğü üzere Ce(III) baskılı polimerin çözelti ortamında bulunan diğer iyonlar yanında Ce(III) iyonuna oldukça yüksek bir seçicilik gösterdiği tespit edilmiştir. Baskısız polimerde ise bütün iyonlar için yüzey adsorpsiyonu kaynaklı bir miktar bağlanma aktivitesi görülmektedir.

Tekrarlanabilirlik Çalışmaları

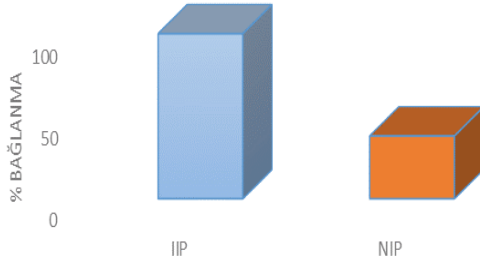
Ce(III) baskılı polimerin yeniden kullanılabilirliğini test etmek için Ce(III) bağlama ve elüsyon döngüsü 10 kez tekrarlanmıştır. Şekil 10’da görülebileceği üzere baskılı polimerin 10. Döngüde bile bağlanma etkinliğinde bir değişme olmadığı tespit edilmiştir.



Şekil 10. Tekrarlanabilirlik Deneyi

Gerçek Numune Çalışmaları (Bastnazit Cevherinden Ce(III)'ün Seçici Olarak Ayrılması)

Bastnazit cevherinde bulunan Ce(III) iyonunun seçici olarak cevher bünyesinden ayırma deneylerinde, ilk olarak temin edilen cevher numunesi uygun tanecik boyutuna getirildikten sonra HNO₃-H₂SO₄ liçi işleme tabi tutulmuş ve çözelti ortamına alınmıştır. Çözelti ortamının pH değeri uygun tamponlarla 5-6 arasına getirilmiş ve bünyesinde bulunan Ce(III) iyonlarının seçici olarak ayrılması için hazırlanan baskılı ve baskısız polimerler ile etkileştirilmiş, işlem sonunda ICP-MS cihazı ile yapılan analizler sonucu Şekil 11'de verilmiştir.



Şekil 11. Bastnazit Cevherinde Bulunan Ce(III) iyonunun Seçici Gerçek Numune Çalışmaları

Şekil 11'den görüldüğü üzere belirlenen optimum koşullarda cevher bünyesinde bulunan Ce(III) iyonlarının tamamı baskılı polimere bağlanırken, baskısız polimere ise aynı koşullarda % 38'ler düzeyinde Ce(III) bağlandığı tespit edilmiştir.

Sonuç

Ce(III) iyonlarına karşı yüksek seçicilikte afinite gösteren Ce(III) baskılı polimer (IIP) hazırlanmıştır. Hazırlanan baskılı polimer yüksek ve seçici bağlanma etkinliği nedeniyle sulu çözeltide bulunan La(III), Th(IV) ve Eu(III) varlığında seçici olarak Ce(III) iyonlarını ayırma potansiyeline sahip olduğu tespit edilmiştir. Elde edilen optimum koşullarda yeniden bağlanma çalışmaları IIP'nin bağlanma bölgeleri ile Ce(III) iyonları arasında yüksek afinite etkileşimlerinin olduğunu göstermiş olup; belirlenen optimum bağlanma koşullarında bastnazit cevherinde bulunan Ce(III) iyonunun seçici olarak

ayrılmasında oldukça etkili ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

Kaynakça

- [1] P., Maestro; D., Huguenin; 'Industrial applications of rare earths: Which way for the end of the century' *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 225, pp. 520-528, 1995.
- [2] C. A. Morais; V. S. T., Ciminelli; 'Process development for the recovery of high-grade lanthanum by solvent extraction' *Hydrometallurgy*, vol. 73, pp. 237-244, 2004.
- [3] İ., Dolak; M., Karakaplan; B., Ziyadanogulları; R., Ziyadanogulları; 'Solvent Extraction, Preconcentration and Determination of Thorium with Monoaza 18-Crown-6 Derivative' *Bulletin of the Korean Chemical Society*, vol. 32, pp. 1564-1568, 2011.
- [4] İ., Yener; E. V., Varhan; İ., Dolak; S., Özdemir; R., Ziyadanogulları; 'A new method for preconcentration of Th (IV) and Ce (III) by thermophilic Anoxybacillus flavithermus immobilized on Amberlite XAD-16 resin as a novel biosorbent' *Ecological Engineering*, vol. 103, pp. 43-49, 2017.
- [5] İ., Dolak; R., Keçili; F., Yılmaz; A., Ersöz; R., Say; 'Selective Recognition and Separation of Ubiquitin by Nanoparticle Embedded Cryogel Traps with Ubiquitin Memories Based on Photosensitive Covalent Imprinting' *Journal of Analytical Chemistry*, vol. 76, pp. 165-171, 2021.
- [6] J. S., Kim; C. H., Lee; S. H., Han; M. Y., Suh; 'Studies on complexation and solvent extraction of lanthanides in the presence of diaza-18-crown-6-di-isopropionic acid' *Talanta*, vol. 45, pp. 437-445, 1997.
- [7] İ., Dolak; R., Keçili; 'Eskişehir bastnazit cevherinde bulunan lantanın zenginleştirilmesi' *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, vol. 13, pp. 79-85, 2022.
- [8] E. V., Oral; S., Özdemir; İ., Dolak; V., Okumus; A., Dunder; B., Ziyadanogulları; Z., Aksoy; R., Onat; Anoxybacillus sp. SO B1-Immobilized Amberlite XAD-16 for Solid-Phase Preconcentration of Cu(II) and Pb(II) and Their Determinations by Flame Atomic Absorption Spectrometry' *Bioremediation Journal*, vol. 19, pp. 139-150, 2015.
- [9] İ., Dolak; 'Eskişehir bastnazit cevherinde bulunan seryumun zenginleştirilmesi' *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, vol. 12, pp. 309-315, 2021.
- [10] C. H., Xiong; X. Z., Liu; C. P., Yao; 'Effect of pH on sorption for RE(III) and sorption behaviors of Sm(III) by D152 resin' *Journal of Rare Earths*, vol. 26, pp. 851-859, 2008.
- [11] K., Ensing; T., De Boer; 'Tailor-made materials for tailor-made applications: application of molecular imprints in chemical analysis' *TrAC, Trends in Analytical Chemistry*, vol. 18, pp. 138-147, 1999.
- [12] B., Sellergrén; 'Molecularly Imprinted Polymers:

- Man-Made Mimics of Antibodies and Their Application in Analytical Chemistry: Techniques and Instrumentation in Analytical Chemistry' *Techniques and Instrumentation in Analytical Chemistry*, vol. 23, pp. 1-557, 2001.
- [13] İ., Dolak; G., Canpolat; A., Ersöz; R., Say; 'Metal chelate based site recognition of ceruloplasmin using molecularly imprinted polymer/cryogel system' *Separation Science and Technology*, vol. 55, pp. 199-208, 2020.
- [14] Z., Baysal; E., Aksoy; İ., Dolak; A., Ersöz; R., Say; 'Adsorption behaviours of lysozyme onto poly-hydroxyethyl methacrylate cryogels containing methacryloyl antipyrine-Ce(III)' *International Journal of Polymeric Materials and Polymeric Biomaterials*, vol. 67, pp.199-204, 2018.
- [15] İ., Dolak; G., Canpolat; R., Keçili; R., Onat; Z., Baysal; B., Ziyadanoğulları; A., Ersöz; R., Say; 'A novel lanthanide-chelate based molecularly imprinted cryogel for purification of hemoglobin from blood serum: An alternative method for thalassemia diagnosis' *Process Biochemistry*, vol. 91, pp. 189-196, 2020.
- [16] G., Canpolat; İ., Dolak; R., Keçili; R., Onat; Z., Baysal; B., Ziyadanoğulları; A., Ersöz; R., Say; 'Development of molecular imprinting-based smart cryogels for selective recognition and separation of serum cytochrome-c as a biochemical indicator' *Process Biochemistry*, vol. 106, pp. 112-119, 2021.
- [17] İ., Dolak; R., Keçili; R., Onat; B., Ziyadanoğulları; A., Ersöz; R., Say; 'Molecularly imprinted affinity cryogels for the selective recognition of myoglobin in blood serum' *Journal of Molecular Structure*, vol. 1174, pp. 171-176, 2018.
- [18] L., Ye; K., Mosbach; 'Polymers recognizing biomolecules based on a combination of molecular imprinting and proximity scintillation: a new sensor concept' *Journal of American Chemical Society*, vol. 123, pp. 2901-2909, 2001.
- [19] G., Canpolat; İ., Dolak; C. G., Hussain; R., Keçili; C. M., Hussain; 'Sample Preparation with Conductive Polymers' *Conductive Polymers in Analytical Chemistry*, vol. 5, pp.119-140, 2022.
- [20] İ., Dolak; R., Keçili; 'Cevherden Flotasyon Yöntemiyle Baritin zenginleştirilmesi' *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, vol. 14, 135-143, 2023.
- [21] L., Zhang; G., Cheng; C., Fu; 'Synthesis and characteristics of tyrosine imprinted beads via suspension polymerization' *Reaction of Functional Polymer*, vol. 56, pp. 167-173, 2003.
- [22] İ., Dolak; 'Selective Adsorption of U(VI) by using U(VI)-imprinted poly-hydroxyethyl methacrylate-methacryloyl-L-histidine (p-[hema-(mah)3]) cryogel polymer' *Applied Ecology and Environmental Research*, vol. 17, pp., 3165-3178, 2018.
- [23] R., Keçili; İ., Dolak; B., Ziyadanoğulları; A., Ersöz; R., Say; 'Ion imprinted cryogel-based supermacroporous trapsfor selective separation of cerium (III)in real sample' *Journal of Rare Earths*, vol. 36, pp., 857-862, 2018.
- [24] İ., Dolak; 'Ion Imprinted AffinityCryogels for the Selective Adsorption Uranium in Real Samples' *Iranian journal of chemistry and chemical engineering*, vol. 38, pp., 115-125, 2019.
- [25] Y., Jiang; D., Kim; 'Synthesis and selective adsorption behavior of Pd(II)-imprinted porous polymer particles' *Chemical Engineering Journal*, vol. 232, pp. 503-509, 2013.
- [26] R., Say; E., Birlik; A., Ersöz; F., Yilmaz; T., Gedikbey; A., Denizli; 'Preconcentration of copper on ion-selective imprinted polymer microbeads' *Analytical Chimica Acta*, vol. 480, pp. 251-260, 2003.
- [27] D. K., Singh; S., Mishra; 'Synthesis, characterization and analytical applications of Ni(II)-ion imprinted polymer' *Applied Surface Science*, vol. 256, pp. 7632-7637, 2010.
- [28] İ., Dolak; R., Keçili; D., Hür; A., Ersöz; R., Say; 'Ion-imprinted polymers for selective recognition of neodymium (III) in environmental samples' *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 54, pp. 5328-5335, 2015.
- [29] B., Guo; F., Deng; Y., Zhao; X., Luo; S., Luo; C., Au; 'Magnetic ion-imprinted and -SH functionalized polymer for selective removal of Pb(II) from aqueous samples' *Applied Surface Science*, vol. 292, pp. 438-446, 2014.
- [30] E., Najafi; F., Aboufazeli; H. R. L., Zadeh Zhad; O., Sadeghi; V. A., Amani; 'Novel magnetic ion imprinted nano-polymer for selective separation and determination of low levels of mercury(II) ions in fish samples' *Food Chemistry*, vol. 141, pp. 4040-4051, 2014.



Betonda ince uçucu kül kullanımı ile ASR genişmesinin azaltılması

Decreasing ASR expansion by using fine fly ash in concrete.Hasan EKER^{1*}, Demet DEMİR ŞAHİN², Mustafa ÇULLU³¹ Karabük Üniversitesi, Eskipazar MYO Mülkiyet Koruma ve Güvenlik Bölümü, eker_hasan78@hotmail.comORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2644-4681>² Gümüşhane Üniversitesi, Gümüşhane MYO Madencilik ve Maden Çıkarma Bölümü, demetdemir2929@hotmail.comORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0338-6562>³ Gümüşhane Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, mcullu@gumushane.edu.trORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0454-7949>

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 5 Ağustos 2022
Revizyon 22 Mart 2023
Kabul 24 Mart 2023
Online 20 Haziran 2023

Anahtar Kelimeler:

Alkali silika reaksiyonu (ASR),
incelik, uçucu kül, C tipi, beton.

ÖZ

Bu çalışmada; Kahramanmaraş'ta yer alan bir termik santralden temin edilen C tipi UK, farklı sürelerde öğütülerek farklı oranlarda çimento ile ikame edilmiş ve Alkali silika reaksiyonu (ASR) üzerindeki etkisi incelenmiştir. İlk önce uçucu kül içermeyen referans numune karışımları ASTM C 1260 standardına göre hazırlanmıştır. Daha sonra UK'nin, 0, 10 ve 20 dk öğütme süreleri sonrasında inceltilen malzemenin her birini betonda çimento yerine % 10 ve % 30 ikame edilerek harç numuneleri hazırlanmıştır. Elde edilen numunelerin 3, 7, 14 ve 28 günlük kür süresi sonrasında ASR genişleme ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre; UK'nin eklendiği numunelerin referans numunesine göre ASR boy değişim oranları azalmıştır. Ayrıca öğütme süresinin ve ikame oranının artmasıyla birlikte ASR boy değişim değerlerinde düşüş meydana geldiği görülmüştür. Genel olarak 0, 10 ve 20 dk öğütme sonrası elde edilen farklı blaine incelik değerine sahip UK'ün % 10 ve % 30 ikame oranlarında çimento yerine kullanılarak hazırlanan harç örneklerinin 3,7 ve 14 günlük kür süreleri sonrasında ASR boy değişim değerlerinde artış gözlemlenmiştir. 28 günlük kür süresi sonrasında ise artış gözlemlenmiş ancak bu diğer kür süreleri sonrasında elde edilen değerlere kıyasla daha düşük olduğu belirlenmiştir. Böylece; UK'ün öğütmeye bağlı olarak inceliğinin ve ikame oranının artmasıyla birlikte betonun bünyesindeki boşlukları doldurması sonucunda geçirimsiz bir beton oluşmuş ve betonda oluşan ASR etkisini azaltmıştır. Ayrıca öğütülmüş uçucu küller harç örneklerinin geçirimsizlik özelliğinin artmasıyla birlikte toz bağlayıcılığında alkali (Na₂O ve K₂O) miktarını azaltması ve Ca(OH)₂'yi C-S-H jellerine dönüştürmesini sağlayarak ASR oluşumunu engellemiştir.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 5 August 2022
Received in revised form 22 March
2023
Accepted 24 March 2023
Available online 20 June 2023

Keywords:

Alkali silica reaction (ASR),
fineness, fly ash, C type, concrete.

ABSTRACT

In this study, the effect of the C-type fly ash from a power plant in Kahamanmaraş on the Alkali silica reaction (ASR) was examined as a result of the addition of different grinding times and different substitution rates to concrete. First, reference sample mixtures without fly ash are prepared according to ASTM C 1260 standard. After the FA grinding times of 0, 10 and 20 minutes, mortar samples were prepared, replacing each thinned material with cement in concrete with 10% and 30%. ASR expansion measurements were performed after the 3, 7, 14 and 28 day curing period of the samples obtained. According to the results obtained, the ASR height variation rates have decreased according to the reference sample of the samples where the FA is added. It has also been seen that the reduction in ASR height variation values has occurred as the grinding time and the substitution rate have increased. In general, an increase in the ASR height change values was observed after the 3, 7 and 14 days of exchange of mortar samples prepared using cement at the FA's 10% and 30% substitution rates with a different blaine thinness value obtained after 0, 10 and 20 min grinding. After the 28-day curing period, the increase was observed, but it was determined that it was lower than the values obtained after these other courtship periods. Thus, as the FA increased its fineness and substitution rate due to grinding, it formed a non-permeable concrete and reduced the ASR effect of concrete as a result of filling the gaps in the concrete. In addition, grinded fly ash has prevented the formation of ASR by allowing mortar samples to be impasted, as well as reducing the amount of alkali (Na₂O and K₂O) in the dust connector and converting CA(OH)₂ into C-S-H gels.

Doi: 0.24012/dumf.1158420

* Corresponding Author

Giriş

Betonun durabilitesini etkileyen en önemli kimyasal reaksiyonlardan biri Alkali Silika Reaksiyonu (ASR)'dur. Betonda patoloji olarak bilinen en yaygın ve genel kimyasal bozulma olayının Alkali-Silika Reaksiyonu (ASR) olduğu söylenebilir. Bu reaksiyon portland çimento içerikli beton ve harçlar arasında oluşmaktadır. Bilindik bu reaksiyon reaktif ince/kaba agregalardaki silisli fazlar ve çimento hamurunun gözenek çözeltisindeki hidroksil iyonları arasında oluşmaktadır. Bu reaksiyon oluşumu, gelişimi ve sürdürülmesi, yeterli nem (beton içinde % 80 veya daha fazla bağıl nem), yüksek alkalinite ve reaktif silisli fazlar gibi üç temel koşulun bir arada olmasından meydana gelmektedir [1]. Bu koşulların bir arada olması sonucu jel (silisli-kalsitli-alkali) meydana gelmektedir. Bu jel beton içerisinde bulunan suyu emmesi sonucu iç basınç oluşturmaya bu da betonda genişlemeye ve çatlak oluşturmaya neden olmaktadır [2]. Kalsiyum ASR oluşumunda aktif role sahip olup reaksiyona kısmen katıldığı zaman çimento pastası içerisinde genişleyen jelin oluşmasına sonucu boşluk çözeltisinde alkalilerin miktarının artmasına sebep olmaktadır [3], [4]. ASR, yüksek su emme özelliğine sahip alkali-silika jel oluşturarak başlar. Çimentodaki alkali oksitler ($\text{Na}_2\text{O} + 0.658 \text{K}_2\text{O}$) ile beton içerisinde agregadaki reaktif silika (SiO_2) kimyasal reaksiyona girerek ASR reaksiyonunu oluşturmaktadır [5]. ASR oluşumunda reaktif agregalar; amorf silika (silikat camları ve opal), kararsız kristal silika polimorfları (kristobalit ve tridimit), kötü şekillendirilmiş kristal silika, kafes yapısında kusurlu kuvars ve mikro kristal kuvars içeren kayalar başta gelmektedir[1], [6]. Jelin içerisinde kimyasal olarak betona zarar veren silika, kalsiyum, potasyum ve sodyum bulunmakta olup zarar verme derecesi jelin bileşimine, betonun gözenekliliğine, partikül boyutuna ve kristal derecesine bağlıdır[7]–[11]. ASR jelinin suyu emme ve şişme yeteneği Ca/Si oranı belirlerken bu oran 0.20 olması durumunda maksimum su emme ve şişme kabiliyeti göstermektedir [11], [12].

ASR betonda yer değiştirmelere, yüzeysel tortu oluşturmaya, çatlama, parça atmasına ve genişlemeye sebep olmaktadır. ASR oluşumunu; kullanılan agrega özellikleri, betonun alkali içeriği, betonun geçirimsizliği, nem durumu, ortam sıcaklığı, dış alkaliler, buz çözücü tuzlar gibi faktörlerin etkilediği bilinmektedir. ASR oluşumunu engellemede düşük su/çimento oranı seçimi, mineral katkı kullanımı (uçucu kül, silis dumanı, yüksek fırın cürufu vb.) ile betonun geçirimsizlik özelliğinin azaltılarak bünyesinde yer alan nem ve alkalilerin hareketini kısıtlayarak ASR oluşumunu azaltmak mümkündür. Uçucu kül bağlayıcı betonlar, çimento bağlayıcı betonlara göre ASR oluşum sürecinde farklı roller üstlenmektedirler[13]–[23]. Uçucu kül katkılı betonlarda ASR genişleme potansiyeli sadece çimento katkılı betonlara göre daha düşüktür. Bu gibi önemli farklılığın altında yatan ana sebep alüminyum açısından zengin uçucu küllerde alümine silikat kaynağı bulunmasıdır. Yüksek alkali ortamda uçucu kül alüminyumun çözünmesini teşvik ederek agregada bulunan reaktif silisin çözünmesini engellediğinden ASR oluşumunu azaltmaktadır. Ayrıca uçucu külde kalsiyum içeriğinin düşük olması viskoziteyi azaltarak hacmi stabil hale getirmesi ile ASR jelinin şişmesini azaltmaktadır [18], [24]. Ayrıca; puzolanlar, çimento harcının

pH içeriğini düşürmesi ile kirecin çözünmesini engellemektedir. Kireç çözünmediğinden miktarında her hangi bir değişiklik meydana gelmez ve bu sayede zarar verici durum oluşturmaz. Düşük pH içeriği, silikanın çözünürlüğünü düşürmesiyle alkali-silika jelin oluşumunu engellemektedir. Bunun yanı sıra uçucu küller betonda bulunan boşlukları doldurması sonucu permabiliteyi azaltmaktadır. Permabilitenin azalması ve boşluk çözeltisinde ASR sonucu oluşan zararlı ürünlerin hareket mekanizması ile yayılımının engellemesi ASR'nuna bağlı oluşması muhtemel zararları minimuma düşürmeyi sağlamaktadır [25].

Uçucu küller ve çimento arasında oluşan puzolanik reaksiyona sonrasında C-S-H jeli oluşmaktadır. Puzolanik reaksiyon karışımdaki kalsiyum miktarını düşürmekte, yani uçucu küllün düşük UK/SiO₂ oranına sahip olması yüksek alkali bağlama özelliği göstermesini sağlamaktadır. Böylece gözenek çözeltisinde bulunan alkalilerin miktarını azaltarak ASR reaksiyonunu kontrol altına almaktadır [26]. Şöyle ki çimento hidratasyonu sonucu açığa çıkan portlanditin (Ca(OH)_2) yüksek kalsiyum içeriğine bağlı olarak ASR oluşturmada büyük etkisi vardır. Hidratasyon sonrası oluşan portlandit ancak uçucu küllün puzolanik reaksiyonu sırasında farklı bileşiklere dönüştürülerek ASR oluşumunu engellemektedir [27]. Ayrıca; betonda Ca(OH)_2 varlığı, reaktif alanların etrafında yarı geçirgen alanlar oluşturmaktadır [28]. Bu alanlar sayesinde Na^+ iyonlarının içeri geçişini, Ca^{+2} , OH^- ve H_2O moleküllerinin ise dışarı çıkışını engellemektedir. Şayet ortamda uçucu küllün olmaması ve portlandit ile reaksiyona girmeme durumu söz konusu durumlarda ASR oluşması kaçınılmazdır. ASR oluşması ile Si^{+4} iyonu malzemelerin reaktif alanlara pompalanmasına ve zarar vermesine neden olmaktadır. Ancak ortamda kalsiyumun bulunmaması ya da uçucu küllün puzolanik reaksiyon sonrası kalsiyumu farklı bileşiklere dönüştürmesi, ASR ürünleri amorf silika şekline geçmekte ve zarar verici boyutunu engellemektedir [29]. Uçucu küllün puzolanik reaksiyonu ile betonda düşük Ca/Si oranlarının kristal yapıda olması, ASR ürünlerinin oluşmasına ve ASR jelinin stabil şekilde olmasına neden olur. Bu jel ise beton bileşiminde uçucu küllün kullanılması ve küllün bileşiminden gelen yüksek Ca ile bir araya gelmesi sonucunda C-S-H yapısına dönüşmektedir [30], [31]. Uçucu küller beton içerisinde kullanıldığında çimento hidratasyonu sonrası açığa çıkan Ca(OH)_2 bileşimini puzolanik reaksiyona dahil etmesi ASR oluşumunu engellemektedir. Ancak uçucu küllün beton içerisinde çimento yerin kullanılmaması durumunda da kireç eklemek mikro yapısında 2 tabaka şeklinde kalsiyum, yüksek sodyum ve potasyum bandı oluşturmaya neden olur ve bu da genişlemeye, iç gerilmelerin artmasına sebep olmaktadır [32]. Bu yüzden uçucu kül; kalsiyum içeriğini ve ASR oluşumuna neden olan alkali miktarını azaltarak oluşturduğu ASR hasarını engellemektedir [33]. Son yıllardaki yapılan araştırmalarda uçucu küllün, boşluk çözeltisi içerisinde reaktif agregayı kontrol ederek ASR yayılım mekanizmasını engellemektedir. Çözelti içerisinde uçucu küllün rolü silikanın yüzey alanına düşen her bir OH^- iyonu ve yüksek alüminyum oksit (Al_2O_3) miktarlarını azaltarak ASR yayılımını engellemektedir [26]. Yapılan mikro yapısal analizler ile örneklerin alüminyumlu NaOH ile doyurulması çok az reaktif agreganın ortaya çıkmasına neden olmaktadır [34]. Ayrıca

ASTM C 1260 [35] standardında örneklere hızlandırılmış harç çubuğu deney yöntemi uygulanmıştır. 25x25x285 mm boyutlarında hazırlanmış örnekler 24 saat sonra kalıplardan alınarak ilk boy değişim değerleri ölçülmüştür. Kalıp sökümünden 1 gün sonra 80 °C derece suda bekletilerek boy ölçümleri alınan örnekler, takip eden kür süreleri için 80 °C derece 1N NaOH (900 ml. saf suya 40 g sodyum hidroksit) çözeltisinde bekletilerek boy değişim değerleri ölçülür. Örnekler %1-3 amorf toz alüminyum hidroksit etkili hızlandırılmış gaza maruz kaldığından ASR genişlemesini engellemekte ve boy değerlerinde değişim gözlenmemektedir [36]. Al elementinin ASR'nu üzerinde bir diğer etkisi çözelti içerisinde reaksiyona dâhil olarak C-A-S-H yapısının oluşumunu arttırmaya buda gözenek çözeltisinde pH değerini düşürmesi ile alkalileri bağlamaya neden olmaktadır [37], [38]. Uçucu külün kimyasal bileşiminde bulunan Al₂O₃, ASR'ye neden olan kalsiyum ve portlandit tüketim kabiliyetini azaltmaktadır [39], [40]. Ayrıca uçucu kül içerisinde yüksek alüminyum oksit (Al₂O₃) içeriğinin etkisi kısaca beton boşluk çözeltisi içerisinde reaktif agreganın çözünmesini kontrol altına aldığı için betonda kısa dönemde daha etkili olduğu, uzun dönem ise henüz çok fazla bir etkisinin olmadığı görülmüştür [41].

Bu çalışmada; C tipi uçucu külün 0 dk, 10 dk ve 20 dk öğütme süreleri sonrasında inceltmesi ile harç içerisinde çimento

yerine %10 ve %30 ikame edilerek örnekler hazırlanmıştır. Hazırlanan bu numunelerin 3, 7, 14 ve 28 günlük kür süresi sonunda ASTM C 1260 standardı kapsamında alkali silika reaksiyonunun (ASR) gelişimi izlenmiştir. Kür süreleri içerisinde harç örneklerinin genleşme değerleri belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre uçucu küllerin farklı incelik ve ikame oranlarında çimento yerine kullanılması ile genleşme değerleri üzerinde etkisi değerlendirilmiştir. Böylece harç örnekleri içerisinde uçucu külün öğütme süresinin ve ikame oranının artmasıyla birlikte ASR oluşum durumu azalmıştır.

Materyal ve Yöntem

Bu çalışmada; çimento, agrega, Afşin Elbistan Termik Santrali'nden elde edilen C tipi uçucu kül (UK) ve şebeke suyu kullanılmıştır.

Kullanılan Malzemelerin Özellikleri

Çalışmada kullanılan CEM I 42.5 R Portland çimentosu Gümüşhane Aşkale Çimento Fabrikasından, UK ise Afşin Elbistan Termik Santralinden temin edilmiştir. Bu malzemelerin belirleyici özellikleri Tablo 1'de verilmiştir [42].

Tablo 1. Uçucu kül ve çimentoya ait tanıtıcı özellikler [42].

Kimyasal Analiz (%)			Fiziksel Testler			UK	
Bileşenler	UK	Çimento	Özellikler	UK	Çimento	Blaine İncelik Değerleri (cm ² /g)	
SiO ₂	29.24	18.59	İncelik (45 µ elek üstü %)	50.68	8.58	Öğütülmemiş (0 dk)	1555
Al ₂ O ₃	11.49	4.65	Özgül Ağırlık	2.54	3.08	10 dk	1632
Fe ₂ O ₃	6.67	3.04				20 dk	2347
CaO	37.84	60.34	Özgül Yüzey (cm ² /g)	1555	4145	Çimento Mekanik Özellikleri	
MgO	1.86	1.92	Priz Başlangıcı (saat-dk)	2 saat-30 dk	2 saat-36 dk		
Na ₂ O	0.38	0.11	Priz Sonu (saat-dk)	3 saat-15 dk	3 saat-19 dk		
K ₂ O	0.69	0.60	Hacim Genişlemesi (mm)	0	0.7		
SO ₃	4.70	2.89	Su İhtiyacı (%)	27.4	29.10	Basınç Dayanımı (N/mm²)	
Cr ₂ O ₃	0.054	-	Su miktarı (g)	137	-	2.Gün	23.9
Mn ₂ O ₃	0.059	-				28.Gün	51.1
P ₂ O ₅	0.494	-					
TiO ₂	0.49	-					
ZnO	0.001	-					
KK	2.31	7.19					
Toplam	96.27	99.42					
SCaO	4.51	0.38					

Çalışmada hazırlanan referans ve uçucu kül katkılı harç örneklerinde kullanılan kireç taşı agregası Gümüşhane yöresinden temin edilmiştir. Ayrıca; harç karışımlarının bazılarında Afşin Elbistan Termik Santral atığı olan C tipi uçucu külü çimento malzemesi yerine iki farklı ikame oranında kullanılmıştır. Bu ikame oranlarından biri % 10 olarak belirlenmiş ve bu belirlemede uçucu külün harç karışımı içerisinde en düşük değeri olarak kabul edilmiştir.

Uçucu külün en düşük değerinde elde edilen ASR bağlı genleşme etkisi belirlenmiştir. İkinci olarak % 30 gibi bir oran düşünülmüştür. Bu oranın seçilme nedeni yapılan önceki çalışmalardan yola çıkılarak uçucu küllerin optimum performans gösterdiği bir ikame oranı olup ASR üzerinde etkisi gözlemlenmiştir. Öğütülmemiş uçucu küle ait kıvama bağlı su ihtiyacı, genleşme ve priz süresi TS EN 196-3+A1[43] standardına göre belirlenmiştir. Uçucu külün farklı

öğütme sürelerine (0, 10 ve 20 dk) ve çimentoya ait blaine incelik değerleri TS EN 450-1 [44] standardına bağlı olarak belirlenmiştir.

çimento malzemeleri kullanılarak hazırlanan karışımlara ait miktarlar verilmiştir. Ayrıca karışımlarda Gümüşhane ili şebeke suyu kullanılmıştır.

Tablo 2’de görüldüğü üzere; hızlandırılmış harç çubuğu deneylerinde kullanılan agrega, uçucu kül, şebeke suyu ve

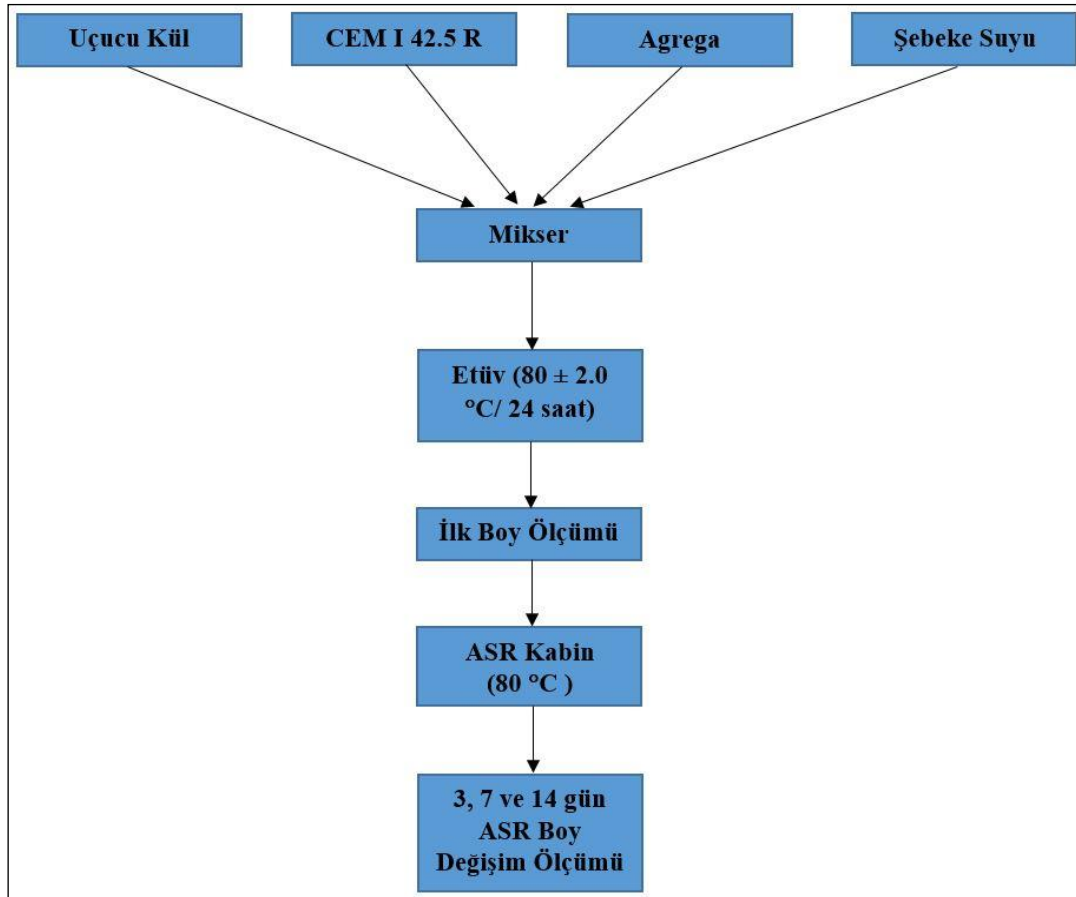
Tablo 2. Deneylerde kullanılan malzeme karışım miktarları.

Karışım Türü	Elek Serisi					S/Ç	Su (ml)	Çimento (g)	Uçucu Kül (g)
	4.75-2.36 mm	2.36-1.18 mm	1.18 mm-600 µm	600-300 µm	300-150 µm				
	% 10	% 25	% 25	% 25	% 15				
Referans	99 g	248 g	248 g	248 g	149 g	0.47	207	440	0
% 10 Uçucu Kül Katkılı	99 g	248 g	248 g	248 g	149 g	0.47	207	396	44
% 30 Uçucu Kül Katkılı	99 g	248 g	248 g	248 g	149 g	0.47	207	308	132

Hızlandırılmış Harç Çubuğu Deneyi

ASTM C 1260 (2021) standardına göre; elek aralıkları için belirlenen miktarlarda uçucu kül içermeyen ve UK içeren karışımlar şeklinde hazırlanmış ve Tablo 2’de sunulmuştur. Daha sonra Tablo 2’de verilen elek aralıklarına ve malzeme miktarlarına göre UK içermeyen referans numuneleri, 10 dk ve 20 dk sürelerle öğütülmüş C tipi UK’ün her biri için % 10 ve % 30 ikame oranlarına sahip numuneler ASTM C 1260 standardına göre harç örnekleri hazırlanmıştır. Her bir kür süresi (3, 7, 14 ve 28 gün) için 3 adet hızlandırılmış harç çubuğu numunesi üretilmiştir. Hazırlanan harç çubukları saf

su içerisinde bekletilmiştir. Daha sonra etüvde (80 ± 2.0 °C sabit ısıda) bekletildikten (24 saat) sonra beton örneklerinin ilk boy değerleri ölçülmüştür. Her bir saf suya (900 ml) sodyum hidroksit (40 g) eklenerek elde edilen NaOH çözeltisi içeren numuneler, hazırlanan ASR kabine yerleştirilmiştir. ASR kabininin sıcaklığı sabit ısıda (80 °C) tutulmuş ve kür sürelerine kadar beton harç örnekleri ASR kabini içerisinde bekletilmiştir. Hazırlanan her bir karışıma ait harç örneklerinin 3, 7, 14 ve 28 gün sonundaki ASR boy değişim ölçümleri yapılmıştır. Şekil 1’de yapılan deneylerin aşamaları gösterilmiştir.



Şekil 1. Hızlandırılmış harç çubuğu deney aşamaları.

Birim boy değişim yüzdelerini belirlemede aşağıdaki Eşitlik 1 kullanılmıştır:

$$\% L = (\Delta L / L) \times 100 \quad (1)$$

Eşitlikte;

$\%L$ = Boy değişim yüzdesi,

ΔL = Örneğin boy değişimi (mm),

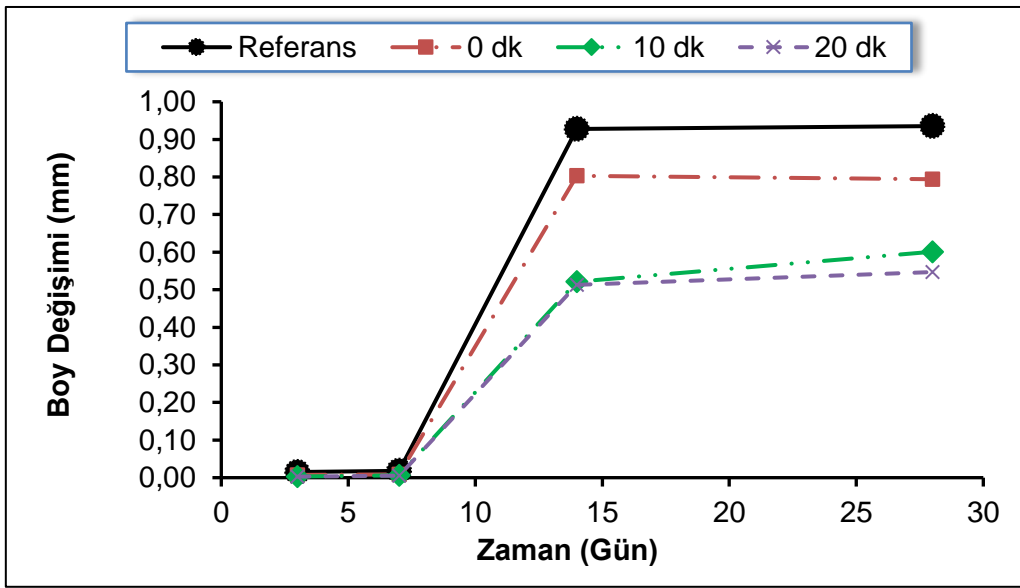
L = Örneğin ilk uzunluğunu (mm) göstermektedir.

Hızlandırılmış harç çubuğu standardına (ASTM C 1260) göre; 14 gün bekletildikten sonra harç örneklerinin limit

değeri $\leq \% 0.10$ ise reaktif değil, $\% 0.10 - \% 0.20$ arasında ise şüpheli, $\geq \% 0.20$ ise reaktivite olduğu belirtilmektedir.

Bulgular ve Tartışma

Bu çalışmada; uçucu kül içermeyen referans, öğütülmemiş $\% 10$ ve $\% 30$ uçucu kül katkılı, 10 dk ve 20 dk öğütme işlemine tabi tutulmuş her bir öğütme süresi için de ayrı ayrı çimento yerine $\% 10$ ve $\% 30$ oranlarında uçucu kül ikame edilerek harç örnekleri hazırlanmıştır. Hazırlanan harç örnekleri 3, 7, 14 ve 28 günlük kür süreleri sonunda alkali silika reaksiyonu (ASR) boy ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Beton içerisinde çimento yerine $\% 10$ ve $\% 30$ uçucu kül ikame edilmesi ile hazırlanan karışımlara ait alkali silika boy değişim sonuçları Şekil 2-3, öğütme süresine bağlı ASR değişimleri ise Şekil 4-6'da verilmiştir.



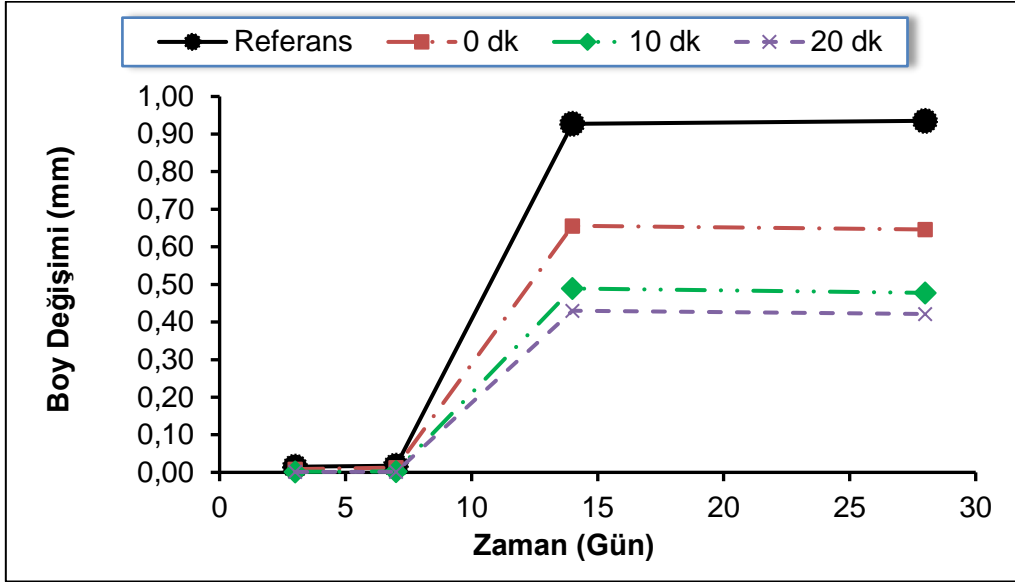
Şekil 2. Harç içerisinde çimento yerine $\% 10$ uçucu kül ikamesi ile hazırlanan karışımların öğütme süresine bağlı olarak alkali silika boy değişimleri

Şekil 2'de görüldüğü gibi; $\% 10$ ikameli 0, 10, 20 dk öğütme işlemine tabi tutulmuş uçucu kül katkılı harç örneğinin boy değişim değerine göre düşüş göstermiştir. $\% 10$ ikameli UK numunelerinin kür süresine bağlı olarak boy değişiminin bütün öğütme sürelerinde 14. güne kadar arttığı, 14. günden sonra 10 dk ve 20 dk öğütme süreli numunelerin ASR değerlerindeki artışın devam ettiği, 0 dk öğütme süreli (öğütülmemiş) numunenin ASR değerinde ise düşüşün meydana geldiği görülmektedir.

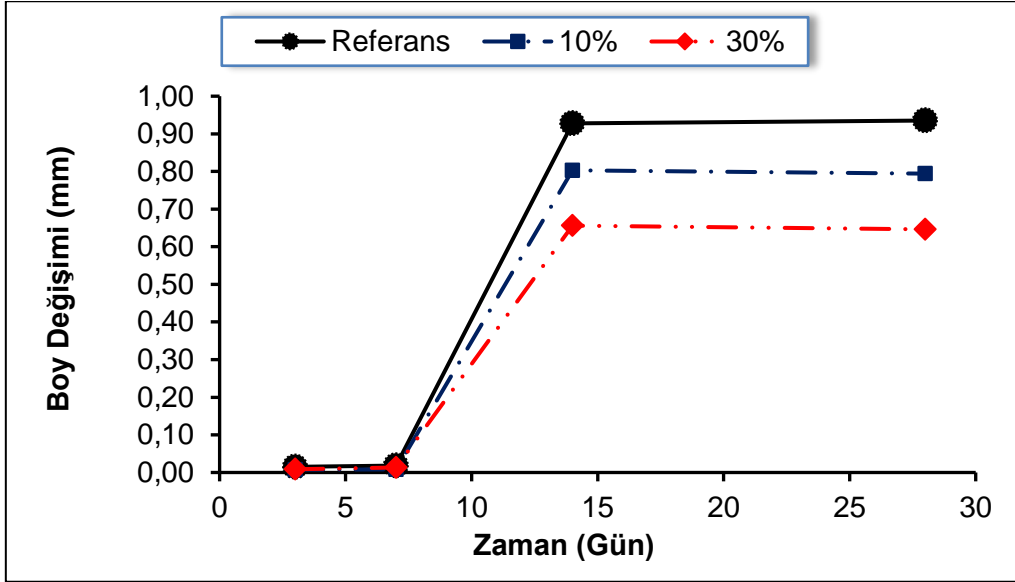
$\% 30$ ikameli 0, 10, 20 dk öğütme işlemine tabi tutulmuş uçucu kül katkılı harç örneklerinin 3, 7, 14 ve 28 günlük ASR sonucu boy değişim değerlerinde, sadece çimento katkılı referans harç örneğinin boy değişim değerine göre düşüş meydana getirmiştir. $\% 30$ ikameli UK numunelerinin kür süresine bağlı olarak boy değişiminin bütün öğütme

sürelerinde 14. güne kadar arttığı, 14. günden sonra 0 dk, 10 dk ve 20 dk öğütme süreli numunelerin ASR değerlerinde düşmenin meydana geldiği görülmektedir (Şekil 3).

Şekil 4'te görüldüğü üzere öğütülmemiş uçucu kül katkılı harç örneklerinin 3, 7, 14 ve 28 günlük kür süresi sonucunda ASR ile elde edilen boy değişim değerleri çimento katkılı referans betonun boy değişim değerlerine göre düşüş göstermiştir. Referans, $\% 10$ ikameli UK ve $\% 30$ ikameli UK numunelerinin kür süresine bağlı olarak boy değişiminin 14. güne kadar arttığı, sonrasında ise çok az miktarda azalmanın olduğu görülmektedir. Bununla birlikte; çimento yerine ikame edilen UK miktarının artmasıyla ASR değerinin düştüğü görülmektedir.



Şekil 3. Harç içerisinde çimento yerine % 30 uçucu kül ikamesi ile hazırlanan örneklerin öğütme süresine bağlı olarak alkali silika boy değişimleri.



Şekil 4. Öğütülmemiş (0 dk) uçucu külü harç içerisinde çimento yerine % 10 ve % 30 ikame edilmesi ile hazırlanan örneklere ait alkali silika boy değişim değerleri.

10 dk öğütülmüş uçucu kül katkı harç örneklerinin 3, 7, 14 ve 28 günlük ASR sonucu boy değişim değerleri çimento katkı referans örneğinin boy değişim değerlerine göre düşüş göstermiştir. Referans, % 10 ikameli UK ve % 30 ikameli UK numunesinin kür süresine bağlı olarak boy değişiminin 14. güne kadar arttığı, 14. günden sonra %10 ikameli UK numunesinin ASR değerindeki artışın devam ettiği, % 30 ikameli UK numunesinde ise ASR değerinde düşüşün meydana geldiği görülmektedir. Bununla birlikte; çimento yerine ikame edilen UK miktarının artmasıyla ASR değerinde düşüş gerçekleşmiştir (Şekil 5).

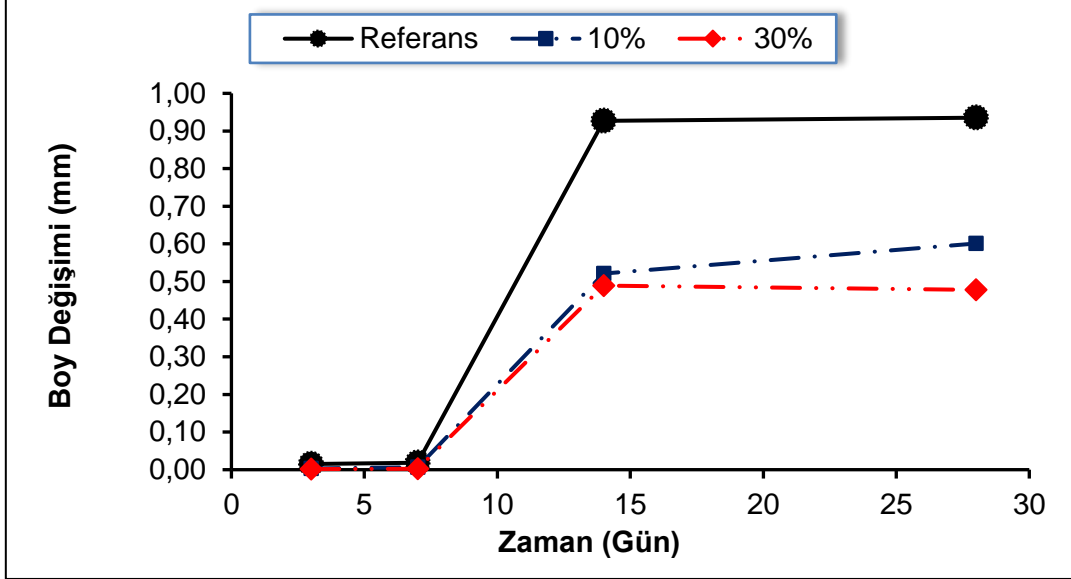
Şekil 6'da görüldüğü gibi, 20 dk öğütme işlemine tabi tutulmuş uçucu kül katkı harç örneklerinin 3, 7, 14 ve 28 günlük ASR sonucu boy değişim değerlerinde, çimento katkı referans harç örneğinin boy değişim değerine göre düşüş göstermiştir. Referans, % 10 ikameli UK ve % 30 ikameli UK numunesinin kür süresine bağlı olarak boy

değişiminin 14. güne kadar arttığı, 14. günden sonra % 10 ikameli UK numunesinin ASR değerindeki artışın devam ettiği, % 30 ikameli UK numunesinde ise ASR değerinde düşüşün meydana geldiği görülmektedir. Bununla birlikte, çimento yerine ikame edilen UK miktarının artmasıyla ASR değerinde düşüş gerçekleşmiştir.

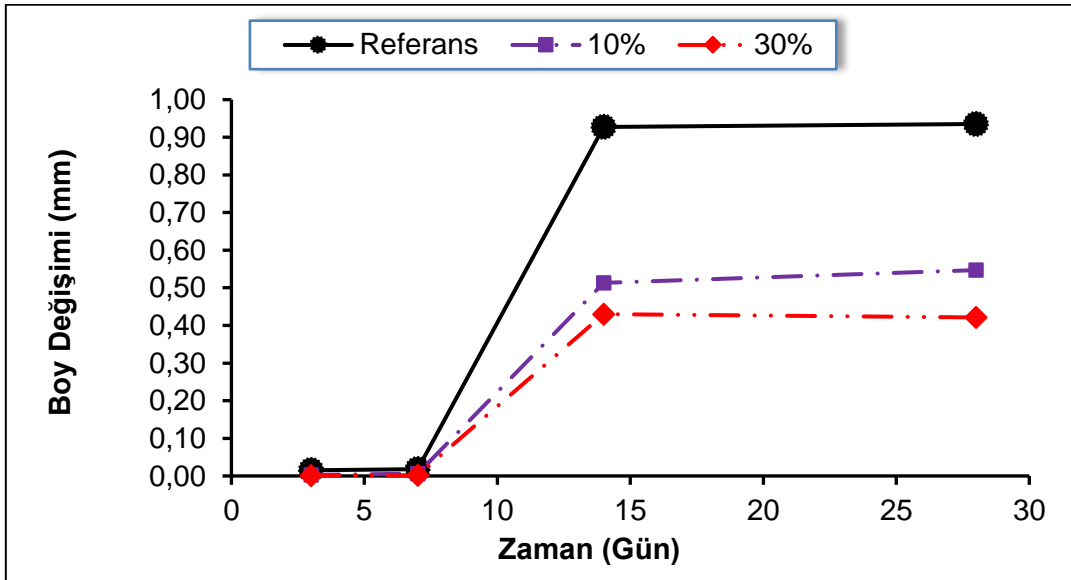
UK öğütme sonrası, incelik değeri ve ikame oranının da ki artışa bağlı olarak harç örneklerinin ASR sonucu birim boy değişim değerleri üzerinde düşürücü etkisi olmuştur. Oruji ve ark., [45] taban külünü bilyeli değirmende öğütmüşler. Öğütme işlemi sonrasında 858.6 m²/kg ve 1101.9 m²/kg gibi iki farklı blaine inceliğinde sahip uçucu kül malzemesini oluşturmuş. Öğütülmemiş uçucu külün blaine inceliğini 379.6 m²/kg ve çalışmada kullanılan çimentonun blaine inceliğini ise 388.3 m²/kg olarak belirlenmişler. Belirlenen farklı blaine inceliğine sahip her bir uçucu kül çimento yerine % 9.1, % 23.1, % 33.3, % 41.2 oranlarında kullanmışlar. Elde

etikleri sonuçlarla bu çalışmada elde edilen sonuçlar kıyaslandığında benzer eğilimde olduğunu göstermiştir. Yapılan çalışmalarında en yüksek ASR boy uzama değerini portland çimentolu katkı betonlardan, taban külünün inceliğine bağlı olarak boy uzama değerlerinde düşüş meydana geldiği ve en fazla düşüşün uçucu kül katkı karışımlarda olduğunu ifade etmişlerdir. Farklı inceliğe sahip taban külü içeren numunelerin ASR değerleri referans numunesine göre daha düşük değer almıştır. Ancak sadece

UK içeren numuneler taban külünün farklı incelik değerlerine kıyasla ASR'ye bağlı boy değerlerinde oluşturduğu düşüşte daha etkili olduğunu görülmüştür. Bu çalışmada ise uçucu külün öğütme süresi ile ASR sonucu birim boy uzama değerlerinde düşüşün daha fazla meydana geldiği tespit edilmiştir. Ayrıca öğütülmemiş uçucu kül katkı betonun, referans numunesi ile kıyaslandığında düşüşün olduğu ancak öğütülmüş uçucu küllere nazaran daha yüksek olduğu görülmüştür.



Şekil 5. 10 dk öğütülmüş uçucu külü harç içerisinde çimento yerine % 10 ve % 30 ikame edilmesi ile hazırlanan örneklere ait alkali silika boy değişim değerleri.



Şekil 6. 20 dk öğütülmüş uçucu külü harç içerisinde çimento yerine % 10 ve % 30 ikame edilmesi ile hazırlanan örneklere ait alkali silika boy değişim değerleri.

Oruji ve ark., [45] UK artan incelik ve çimento içerisindeki ikame oranına göre ASR boy değişiminin en az olduğu karışımı % 41.2 oranında uçucu kül katkı beton örneklerinde rastlamışlar. Bu çalışmada ise ASR boy değişimi çimento yerine % 30 UK ikame oranında kullanılan harç örneklerinde

rastlanmıştır. Alkali silika reaksiyonu üzerine uçucu külün incelik ve ikame oranının etkisi önemsenmeyecek kadar büyük boyutlarda olsa da farklı faktörler devreye girdiğinde etkinlikte değişiklikler oluşturduğu görülmektedir. Bu faktörlerin başında çözünür alimüna içeriği, gözenek

solisyonu, alkalite ve gözeneklilik gibi değişkenlerin neden olduğu düşünülmektedir [26]. Ayrıca bu çalışmada öğütülmüş uçucu külün kullanımı ile ASR üzerinde 0, 3, 7 günlük kür süreleri sonunda azaltıcı rolünün olması artan öğütme süresine bağlı olarak ince malzeme oluşmasına ve bu malzemenin de karışım içerisinde boşlukları doldurucu etki oluşturmasından ileri gelmiştir. 14 ve 28 günlük kür sürelerinde meydana gelen değişikliklerin nedenleri ise puzolanik reaksiyonun oluşumundan ileri anlaşılmıştır. Bu etki özellikle % 30 oranında uçucu külü çimento yerine kullanıldığında erken dönemde ASR'ye bağlı daha az genleşme oluşturduğu ilerleyen günlerde (850 gün sonra) ise ASR genleşme oranı daha yüksek olduğunu gösteren çalışmalarda ortaya konmaktadır [1]. Özellikle öğütmenin etkisi ile ince boyuta getirilen uçucu külün, filler (dolgu) etkisi oluşturması ASR mekanizmasının oluşumuna neden olan boşluklardaki nem ve alkalilerin taşınmasını engelleyici özellik kazandırmaktadır. Ayrıca UK inceliğinin kimyasal olarak puzolanik reaksiyonu artırıcı özellik göstermesi; reaksiyon sonrası daha fazla C-S-H ürününün açığa çıkmasına, zararlı alkalileri bağlamaya, daha kompakt ve boşlukları doldurması ile ASR oluşturma mekanizmasını engelleyici özellik göstermesinden kaynaklanmaktadır. Ramjan ve ark., [46] çalışmalarında uçucu külü eleme yöntemi ile iki farklı boyuta getirip % 20 oranında çimentoyla yer değiştirerek harç örnekleri hazırlanmış ve uçucu kül katkısız harca göre ASR boy değişim değerlerini karşılaştırmışlardır. Elde ettikleri sonuçlara göre uçucu kül inceliğindeki artışla beraber ASR boy değişim değerinin düştüğünü tespit etmişlerdir. Özellikle öğütme sonrası oluşan UK inceliğinin etkisi 14 günlük kür süresine sahip örneklerde ASR boy değişim değerlerinde % 50 değerinde azalma meydana getirdiğini belirtmişlerdir. Bu çalışma da ise 14 gün sonrasında UK öğütme ile inceliğin ASR değerleri üzerinde çok fazla bir değişikliğe neden olmadığı görülmüştür [47], [48]. ASR'nu önlemede uçucu külü öğütterek ince boyuta getirmek eleme yöntemi ile boyutsal değişimden daha etkin bir yöntem olduğu yapılan çalışmalarda açıkça belirtilmektedir. Özellikle ASR betonun durabilitesini etkileyen kimyasal bir reaksiyon olup durabilite üzerinde UK inceliğinin etkisi çalışılmıştır. Hsu ve ark., [49] çalışmalarında uçucu kül inceliğinin durabilite özellikleri üzerine etkisini incelemişler. Burada F tipi uçucu külü bilyeli değirmende öğütme ile 4610 cm²/g, 5690 cm²/g, ve 6300 cm²/g, blaine incelik değerleri elde etmişler. Bu inceliklerin her birini çimento yerine % 0, % 10, % 15 ve % 20 oranında kullanarak harç örnekleri oluşturmuşlar. Elde ettikleri sonuçlara göre inceliği 5690 cm²/g, olan uçucu külden % 20 oranında hazırlanan harç örneklerinden en yüksek basınç dayanımı, en düşük su ve porozite değerini verdiğini belirtmişlerdir. Uçucu kül inceliğinin ve ikame oranının artması çimento hidratasyonu sonucu açığa çıkan Ca(OH)₂ miktarını azaltarak oluşturulan katkılı çimento harçlarının özelliklerini olumlu yönde etkilemesi ile durabiliteyi geliştirdiği sonucuna varmışlardır. Yüksek durabilite özelliğine sahip uçucu kül katkılı harçlar normal çimento katkılı harçlara göre daha az ASR boy değişim olayı meydana gelmiştir. ASR mekanizmasına bağlı boy değişim değerleri uçucu kül katkılı harçlarda ya da beton üretiminde uçucu külün incelik ve ikame oranına bağlı poroziteyi düşürmesi ile boy değişim değerlerinde düşüşü sağlamıştır. Hsu ve ark., [50] çalışmalarında ise uçucu külü 3150 cm²/g, 5690 cm²/g,

iki farklı incelik değerinde betonda çimento yerine % 30, % 40 ve % 50 oranlarında ikame etmişlerdir. Çalışmalarında basınç dayanımı, su emilimi, klor geçişi ve civa porozimetresi üzerine etkisini araştırmışlar. Araştırma sonucuna göre uçucu külün incelik değerinin 5690 cm²/g, ve % 40 oranında betonda çimento ile yer değiştirilerek üretilen betonların özelliklerinin değişimi ve yüksek performans sağladığını ifade etmişlerdir. Yapılan birçok çalışmada ve bu çalışmada uçucu külün incelik ve ikame oranının artması çimento pastasını, harcını ve betonun sadece ASR sonucu oluşan boy değişim değerleri üzerinde etkisinin yanı sıra malzemenin özelliklerini arttıran ve daha dayanıklı duruma gelmesini sağlayan birçok özellik üzerine etkisini ortaya koymuşlardır.

Sonuç

Bu çalışmada; uçucu külün (C tipi) farklı öğütme sürelerinde (0 dk, 10 dk ve 20 dk) farklı ikame oranlarında (% 10 ve % 30) beton karışım örnekleri hazırlanmıştır. Hazırlanan bu numuneler; 3, 7, 14 ve 28 günlük kür süresi sonunda ASTM C 1260 standardına göre alkali silika reaksiyonu (ASR) değerleri ölçülmüştür. Elde edilen farklı öğütme süreli ve ikame oranlı uçucu kül katkısının betonun ASR özelliği üzerine oluşturduğu etkisi konusunda değerlendirmeler yapılmıştır. Sonuç olarak çalışma kapsamında aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- ❖ % 10 ve % 30 uçucu kül ikameli harç örneklerinin ASR boy uzama miktarları referans numunenin değerine göre daha az olduğu ve uçucu kül ikamesinin ASR değerinde düşüş sağladığı anlaşılmıştır.
- ❖ Uçucu kül ikame oranının artmasıyla birlikte harç örneklerinin ASR özelliğinde meydana gelen düşüş miktarı da artmıştır.
- ❖ Öğütme süresinin artmasıyla birlikte ASR değerlerinde de düşüşler meydana gelmiştir.
- ❖ Harç örnekleri içerisinde uçucu külün öğütme süresinin ve ikame oranının artmasıyla birlikte ASR oluşum durumu azalmaktadır.
- ❖ Harç içerisinde uçucu kül kullanımı ve özellikle uçucu külün öğütülerek inceliğinin artırılması sonucunda örnekler geçirimsiz özellik kazandırılması ile boşlukların azaltılmasına katkı sağlamıştır.
- ❖ Bu durum; boşluk miktarı azalan örneklerde ASR sonucu oluşabilecek hasara karşı uzun ömürlü beton karışımlarının oluşturulmasına katkı sağlayacaktır.

Bu konuda daha sonra yapılacak çalışmalarda; daha fazla öğütme süresine sahip uçucu küllerin kullanımının araştırılması ve farklı tip uçucu küllerin ASR üzerindeki etkisinin araştırılmasının yerinde olacağı düşünülmektedir.

Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

“Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur”

“Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır”

Yazar Katkıları

Eker: Veri toplama, Verilerin analizi ve yorumlanması, Taslağın oluşturulması, Revizyon.

Demir Şahin: Veri toplama, Verilerin analizi ve yorumlanması, Taslağın oluşturulması.

Çullu: Çalışma konsepti ve tasarım.

Teşekkür

Yazarlar; Gümüşhane Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü öğrencilerine yardımlarından dolayı teşekkür ederler.

Kaynakça

- [1] M. D. A. T. K. J. F. B. F. T. D. S. I. Garber, “Methods for Preventing ASR in New Construction: Results of Field Exposure Sites,” United States, 2013.
- [2] M.-A. Berube and B. Fournier, “Les produits de la réaction alcalis-silice dans le béton; etude de cas de la region de Quebec,” *Can. Mineral.*, vol. 24, no. 2, pp. 271–288, Jun. 1986.
- [3] E. Grimal, “Caractérisation des effets du gonflement provoqué par la réaction alcali-silice sur le comportement mécanique d’une structure en béton,” Université Paul Sabatier, Toulouse, France, 2007.
- [4] A. . Rodrigue, J. . Duchesne, B. . Fournier, M. . Champagne, and B. . Bissonnette, “Alkali-silica reaction in alkali-activated combined slag and fly ash concretes: The tempering effect of fly ash on expansion and cracking,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 251, p. 118968, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118968.
- [5] İ. Demir, Ö. Sevim, and İ. Kalkan, “Microstructural properties of lithium-added cement mortars subjected to alkali-silica reactions,” *Sādhanā*, vol. 43, no. 7, p. 112, Jul. 2018, doi: 10.1007/s12046-018-0901-3.
- [6] F. Naiqian, J. Hongwei, and C. Enyi, “Study on the suppression effect of natural zeolite on expansion of concrete due to alkali-aggregate reaction,” *Mag. Concr. Res.*, vol. 50, no. 1, pp. 17–24, Mar. 1998, doi: 10.1680/mac.1998.50.1.17.
- [7] L. S. Dent Glasser and N. Kataoka, “The chemistry of ‘alkali-aggregate’ reaction,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 11, no. 1, pp. 1–9, Jan. 1981, doi: 10.1016/0008-8846(81)90003-X.
- [8] N. Thaulow, H. Jakobsen, Ulla, and B. Clark, “Composition of alkali silica gel and ettringite in concrete railroad ties: SEM-EDX and X-ray diffraction analyses,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 26, no. 2, pp. 309–318, Feb. 1996, doi: 10.1016/0008-8846(95)00219-7.
- [9] I. Fernandes, “Composition of alkali-silica reaction products at different locations within concrete structures,” *Mater. Charact.*, vol. 60, no. 7, pp. 655–668, Jul. 2009, doi: 10.1016/j.matchar.2009.01.011.
- [10] T. Katayama, “Petrographic Study of the Alkali-Aggregate Reactions in Concrete,” University of Tokyo, 2012.
- [11] A. Leemann and C. Merz, “An attempt to validate the ultra-accelerated microbar and the concrete performance test with the degree of AAR-induced damage observed in concrete structures,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 49, pp. 29–37, Jul. 2013, doi: 10.1016/j.cemconres.2013.03.014.
- [12] A. Gholizadeh-Vayghan and F. Rajabipour, “Quantifying the swelling properties of alkali-silica reaction (ASR) gels as a function of their composition,” *J. Am. Ceram. Soc.*, vol. 100, no. 8, pp. 3801–3818, Aug. 2017, doi: 10.1111/jace.14893.
- [13] P. M. Gifford and J. E. Gillott, “Alkali-silica reaction (ASR) and alkali-carbonate reaction (ACR) in activated blast furnace slag cement (ABFSC) concrete,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 26, no. 1, pp. 21–26, Jan. 1996, doi: 10.1016/0008-8846(95)00182-4.
- [14] Z. Xie, W. Xiang, and Y. Xi, “ASR Potentials of Glass Aggregates in Water-Glass Activated Fly Ash and Portland Cement Mortars,” *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 15, no. 1, pp. 67–74, Feb. 2003, doi: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2003)15:1(67).
- [15] S. Tuylu, “Effect of different particle size distribution of zeolite on the strength of cemented paste backfill,” *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, Sep. 2021, doi: 10.1007/s13762-021-03659-7.
- [16] I. García-Lodeiro, A. Palomo, and A. Fernández-Jiménez, “Alkali-aggregate reaction in activated fly ash systems,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 37, no. 2, pp. 175–183, Feb. 2007, doi: 10.1016/j.cemconres.2006.11.002.
- [17] F. Puertas, M. Palacios, A. Gil-Maroto, and T. Vázquez, “Alkali-aggregate behaviour of alkali-activated slag mortars: Effect of aggregate type,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 31, no. 5, pp. 277–284, May 2009, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2009.02.008.
- [18] M. Thomas, A. Dunster, P. Nixon, and B. Blackwell, “Effect of fly ash on the expansion of concrete due to alkali-silica reaction – Exposure site studies,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 33, no. 3, pp. 359–367, Mar. 2011, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2010.11.006.
- [19] Y. Kawabata and K. Yamada, “The mechanism of limited inhibition by fly ash on expansion due to alkali-silica reaction at the pessimum proportion,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 92, pp. 1–15, Feb. 2017, doi: 10.1016/j.cemconres.2016.11.002.
- [20] Z. Shi, C. Shi, S. Wan, and Z. Ou, “Effect of alkali dosage on alkali-silica reaction in sodium hydroxide activated slag mortars,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 143, pp. 16–23, Jul. 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.03.125.
- [21] R. Tänzler, Y. Jin, and D. Stephan, “Effect of the inherent alkalis of alkali activated slag on the risk of alkali silica reaction,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 98, pp. 82–90, Aug. 2017, doi: 10.1016/j.cemconres.2017.04.009.
- [22] D. Adiguzel, A. Bascetin, and S. A. Baray, “Determination of Optimal Aggregate Blending to Prevent Alkali-Silica Reaction Using the Mixture Design Method,” *J. Test. Eval.*, vol. 47, no. 1, p. 20160441, Jan. 2019, doi: 10.1520/JTE20160441.
- [23] A. Bascetin, D. Adiguzel, H. Eker, E. Odabas, and S. Tuylu, “Effects of pozzolanic materials in surface paste disposal by pilot-scale tests: observation of physical changes,” *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, Aug. 2020, doi: 10.1007/s13762-020-02892-w.
- [24] T. Yang, Z. Zhang, Q. Wang, and Q. Wu, “ASR potential of nickel slag fine aggregate in blast furnace slag-fly ash geopolymer and Portland cement mortars,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 262, p. 119990, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119990.

- 10.1016/j.conbuildmat.2020.119990.
- [25] A. U. Shettima, M. W. Hussin, Y. Ahmad, and J. Mirza, "Evaluation of iron ore tailings as replacement for fine aggregate in concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 120, pp. 72–79, Sep. 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.05.095.
- [26] S. M. H. Shafaatian, A. Akhavan, H. Maraghechi, and F. Rajabipour, "How does fly ash mitigate alkali-silica reaction (ASR) in accelerated mortar bar test (ASTM C1567)?" *Cem. Concr. Compos.*, vol. 37, pp. 143–153, Mar. 2013, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2012.11.004.
- [27] F. Rajabipour, E. Giannini, C. Dunant, J. H. Ideker, and M. D. A. Thomas, "Alkali-silica reaction: Current understanding of the reaction mechanisms and the knowledge gaps," *Cem. Concr. Res.*, vol. 76, pp. 130–146, Oct. 2015, doi: 10.1016/j.cemconres.2015.05.024.
- [28] S. Chatterji, A. D. Jensen, N. Thaulow, and P. Christensen, "Studies of alkali-silica reaction. Part 3. Mechanisms by which NaCl and Ca(OH)₂ affect the reaction," *Cem. Concr. Res.*, vol. 16, no. 2, pp. 246–254, Mar. 1986, doi: 10.1016/0008-8846(86)90141-9.
- [29] S. Joseph, R. Snellings, and Ö. Cizer, "Activation of Portland cement blended with high volume of fly ash using Na₂SO₄," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 104, p. 103417, Nov. 2019, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2019.103417.
- [30] K. Kurtis, P. J. Monteiro, J. Brown, and W. Meyer-Ilse, "Imaging of ASR Gel by Soft X-Ray Microscopy," *Cem. Concr. Res.*, vol. 28, no. 3, pp. 411–421, Mar. 1998, doi: 10.1016/S0008-8846(97)00274-3.
- [31] Z. Shi and B. Lothenbach, "The role of calcium on the formation of alkali-silica reaction products," *Cem. Concr. Res.*, vol. 126, p. 105898, Dec. 2019, doi: 10.1016/j.cemconres.2019.105898.
- [32] R. F. Bleszynski and M. D. A. Thomas, "Microstructural Studies of Alkali-Silica Reaction in Fly Ash Concrete Immersed in Alkaline Solutions," *Adv. Cem. Based Mater.*, vol. 7, no. 2, pp. 66–78, Mar. 1998, doi: 10.1016/S1065-7355(97)00030-8.
- [33] S. Guo, Q. Dai, X. Sun, X. Xiao, R. Si, and J. Wang, "Reduced alkali-silica reaction damage in recycled glass mortar samples with supplementary cementitious materials," *J. Clean. Prod.*, vol. 172, pp. 3621–3633, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.11.119.
- [34] T. Chappex and K. L. Scrivener, "The influence of aluminium on the dissolution of amorphous silica and its relation to alkali silica reaction," *Cem. Concr. Res.*, vol. 42, no. 12, pp. 1645–1649, Dec. 2012, doi: 10.1016/j.cemconres.2012.09.009.
- [35] ASTM C1260, "Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method)," West Conshohocken, PA, 2021. doi: 10.1520/C1260-21.
- [36] A. Brykov and A. Anisimova, "Efficacy of Aluminum Hydroxides as Inhibitors of Alkali-Silica Reactions," *Mater. Sci. Appl.*, vol. 04, no. 12, pp. 1–6, 2013, doi: 10.4236/msa.2013.412A001.
- [37] S.-Y. Hong and F. Glasser, "Alkali sorption by C-S-H and C-A-S-H gels," *Cem. Concr. Res.*, vol. 32, no. 7, pp. 1101–1111, Jul. 2002, doi: 10.1016/S0008-8846(02)00753-6.
- [38] M. Thomas, "The effect of supplementary cementing materials on alkali-silica reaction: A review," *Cem. Concr. Res.*, vol. 41, no. 12, pp. 1224–1231, Dec. 2011, doi: 10.1016/j.cemconres.2010.11.003.
- [39] B. F. K.J. Folliard, R. Barborak, T. Drimalas, L. Du, S. Garber, J. Ideker, T. Ley, S. Williams, M. Juenger, "Preventing ASR/DEF in New Concrete," 2006.
- [40] R. B. Figueira et al., "Alkali-silica reaction in concrete: Mechanisms, mitigation and test methods," *Constr. Build. Mater.*, vol. 222, pp. 903–931, Oct. 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.230.
- [41] R. Hay and C. P. Ostertag, "New insights into the role of fly ash in mitigating alkali-silica reaction (ASR) in concrete," *Cem. Concr. Res.*, vol. 144, p. 106440, Jun. 2021, doi: 10.1016/j.cemconres.2021.106440.
- [42] D. Demir, Şahin, M. Çullu, and H. Eker, "Betona Eklenen Uçucu Külün Aşındırma ve Karbonatlaşma Üzerine Etkisi," *Eur. J. Sci. Technol.*, pp. 1150–1163, Dec. 2019, doi: 10.31590/ejosat.654733.
- [43] Türk Standartlar Enstitüsü, "TS EN 196-3: Çimento deney yöntemleri - Bölüm 3: Priz süreleri ve genleşme tayini," Ankara, Türkiye, 2017.
- [44] Turkish Standards Institution, "TS EN 450-1: Uçucu Kül - Betonda kullanılan - Bölüm 1: Tarif, özellikler ve uygunluk kriterleri," Ankara, Türkiye, 2013.
- [45] S. Oruji et al., "Mitigation of ASR expansion in concrete using ultra-fine coal bottom ash," *Constr. Build. Mater.*, vol. 202, pp. 814–824, Mar. 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.01.013.
- [46] S. Ramjan, W. Tangchirapat, C. Jaturapitakkul, C. Chee Ban, P. Jitsangiam, and T. Suwan, "Influence of Cement Replacement with Fly Ash and Ground Sand with Different Fineness on Alkali-Silica Reaction of Mortar," *Materials (Basel)*, vol. 14, no. 6, p. 1528, Mar. 2021, doi: 10.3390/ma14061528.
- [47] C.-S. Shon, D. G. Zollinger, and S. L. Sarkar, "Evaluation of modified ASTM C 1260 accelerated mortar bar test for alkali-silica reactivity," *Cem. Concr. Res.*, vol. 32, no. 12, pp. 1981–1987, Dec. 2002, doi: 10.1016/S0008-8846(02)00903-1.
- [48] T. C. Esteves, R. Rajamma, D. Soares, A. S. Silva, V. M. Ferreira, and J. A. Labrincha, "Use of biomass fly ash for mitigation of alkali-silica reaction of cement mortars," *Constr. Build. Mater.*, vol. 26, no. 1, pp. 687–693, Jan. 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.06.075.
- [49] S. Hsu, M. Chi, and R. Huang, "Effect of fineness and replacement ratio of ground fly ash on properties of blended cement mortar," *Constr. Build. Mater.*, vol. 176, pp. 250–258, Jul. 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.05.060.
- [50] S. Hsu, M. Chi, and R. Huang, "Influence of Fly Ash Fineness and High Replacement Ratios on Concrete Properties," *J. Mar. Sci. Technol.*, vol. 27, no. 9, 2019.



Key Factors that Affect the Behavior of Steel Beams and Columns in Special Moment Frames

Gülen Özkula^{1*}

¹ Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, gozkula@nku.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1947-6362>

ARTICLE INFO

Article history:

Received 17 October 2022
Received in revised form 5 April 2023
Accepted 18 June 2023
Available online 20 June 2023

Keywords:

Special Moment Frames, Deep columns, Column bracing, Beam bracing

Doi: 10.24012/dumf.1190792

* Corresponding author

ABSTRACT

Steel Special Moment Frames (SMFs) are favored seismic force-resisting systems due to their architectural flexibility and high ductility. While shallow columns (section depth less than 356 mm) were commonly used in these systems before the Northridge earthquake, deeper columns (section depth greater than 356 mm) have become more popular in recent years to meet code-enforced story drift requirements economically. However, limited research exists on the hinging behavior of deep columns under axial compression and cyclic drift. Since deep columns exhibit larger slenderness ratios and are more susceptible to local and global buckling, understanding their behavior is crucial. This study investigates the behavior of fifteen four-story steel SMFs using finite element program simulations, focusing on four key factors affecting frame behavior: 1) Column bracing, 2) Beam bracing, 3) Column stiffening, and 4) Strong Column Weak Beam (SCWB) ratio. The influence of axial force level and column section properties is also examined. Results demonstrate that deep columns may experience local and/or global instabilities at relatively low story drift levels. Findings suggest that SMF performance can be enhanced by bracing deep columns at the top and bottom levels of beam flanges and adding stiffeners to the columns' web. Controlling column shortening by increasing the SCWB ratio is also recommended.

Introduction

Steel special moment frames (SMFs) are widely used as seismic force-resisting systems (SFRS) in high-seismic regions due to their architectural flexibility and high ductility capacity. The unexpected non-ductile failure of seismically designed steel moment connections observed after the Northridge, California earthquake prompted extensive research into the behavior of these SMFs. Significant studies have been conducted to examine the cyclic behavior and design of beam-to-column connections, including work by the SAC Joint Venture [1]. While the cyclic behavior of beams has been extensively investigated, as plastic hinging is anticipated in an SMF, the behavior of columns has received less attention.

Various experimental studies have shown that a structural component's hysteretic behavior depends on numerous factors that significantly influence its deformation and energy dissipation characteristics. Consequently, collapse assessment methodologies for structural systems with component deterioration have been proposed by [2] and [3], based on the fundamentals outlined by [4]. Lignos and Krawinkler [5] revised the deterioration models for beams with reduced beam sections (RBS) and non-RBS

members. Newell and Uang [6] evaluated nine full-scale W14 columns for use in braced frames, demonstrating that stocky columns can achieve substantial inelastic story drift capacities (0.75Py) even under strong axial stresses.

Before the Northridge earthquake, shallow columns (section depth less than 356 mm) were commonly used in these SFRSs. However, to meet code-enforced story drift criteria and achieve design economy, deeper columns have become increasingly popular in recent years. Despite their widespread use, limited research has been conducted on the behavior of these columns under axial compression and cyclic drift. Examining the behavior of deep columns is crucial, as they have higher slenderness ratios and are more susceptible to both local and global buckling. Newell and Uang's [6] numerical studies revealed that deep W27 columns subjected to high axial loads experience rapid strength degradation due to simultaneous flange and web local buckling.

Elkady and Lignos [7] later employed finite element modeling to investigate the behavior of deep beam-columns, observing both axial shortening and significant strength deterioration as a result of local buckling. Cheng et al. [8] subjected nine wide-flange cantilever members with large width-to-thickness ratios to cyclic lateral

displacement under constant axial loads for weak-axis bending. Local instabilities were identified as the cause of each member's failure mechanism, leading the authors to conclude that the section categorization procedures in the current design requirements are unsuitable for wide-flange sections bent around their weak-axis.

Fogarty and El-Tawil [9] used detailed finite element models to assess the response of deep columns, finding that many deep columns meeting the AISC high ductility criteria were unable to achieve 4% lateral drift under axial loads between $0.2P_y$ and $0.4P_y$. The web's width-to-thickness ratio has a greater impact than the flange's. Suzuki and Lignos [10] tested lighter W14 cantilever columns using various loading protocols, determining that realistic loading histories are necessary for calibrating component deterioration models. These protocols should also capture the member's ratcheting effect before failure. Wu et al. [11] emphasized the importance of selecting appropriate loading histories when analyzing the collapse of deep columns using finite element modeling.

To explore the cyclic response of these columns for use in SMFs, Ozkula et al. [12] and [13] conducted forty-eight full-scale deep column tests. This test program's data were used to: (1) calibrate analytical models; (2) build a comprehensive database on deep columns; (3) classify sections according to their buckling modes; (4) assess the suitability of AISC 341's design provisions for seismic design of new construction; and (5) evaluate ASCE 41's design provisions for seismic assessment of existing construction. Although the cross-sections of these columns met the highly ductile (λ_{nd}) condition outlined in the AISC Seismic Provisions or AISC 341 [14], the authors demonstrated that deep columns could undergo significant buckling and axial shortening for use in SMFs. Web local buckling (WLB) interacted with flange local buckling (FLB), which was not considered by AISC 341, resulting in substantial shortening. Testing shallow and stocky W14 columns [6] did not reveal significant column shortening, as WLB did not occur. Some column tests also uncovered an "unexpected" failure scenario involving both local buckling and lateral-torsional buckling (LTB). A parametric analysis of 110 beam-columns was conducted using high-fidelity ABAQUS [15] nonlinear finite element simulations to cover a wide range of slenderness ratios, axial force levels, and yield stresses, aiming to improve the database for both cyclic modeling and design recommendations.

Majority of the previous studies focused on member-level analysis of deep columns. In this study, ABAQUS CAE [15] was used to model a subassembly of deep columns to investigate the effects of column bracing, beam bracing, column stiffening, and the Strong Column Weak Beam (SCWB) ratio. The findings indicated that bracing deep columns at the top and bottom levels of the beam flanges and adding stiffeners to the web of these columns could enhance the performance of SMFs. The concept is that by

increasing the SCWB ratio, column shortening can be prevented.

Arctype Building

Prior studies [13] have shown that the hysteretic response of columns is characterized by the beam-column buckling mode. The governing buckling mode, or failure mode, can be categorized into three types: (1) Symmetric Flange Local Buckling (SFB) mode, (2) Anti-symmetric Local Buckling (ALB) mode, and (3) Coupled Buckling (CB) mode. Ozkula et al. [13] proposed predicting these modes using a parameter based on the section slenderness properties within a certain limit of L/r_y . In this study, the observed column behaviors are explained using the failure mode classifications suggested by Ozkula et al. [13].

The primary motivation for the configuration of the new archetype building was the use of deep slender columns tested by Ozkula et al. [13]. As the main objective in the design of the archetype building was to validate the accuracy of the component-level test results, the first-story columns for the archetype building were selected from the columns tested by Ozkula et al. [12] and Newell and Uang [6]. This allowed for the observation of the behavior of sections that failed in SFB, ALB, and CB failure modes. Harris and Speicher's study [16] was utilized to define the prototype building and its applied loads (dead, live, and seismic). Lateral loads were resisted by the symmetrically located special moment frames along the East-West (E-W) direction and special concentrically braced frames along the North-South (N-S) direction in the prototype building. However, only the assessment of the moment frames will be presented in this study.

Figure 1 displays the plan and elevation view of the archetype building, with the location of tributary gravity loads allocated to the frames shaded. Span lengths are 9.1 meters (30 ft) and 6 meters (20 ft) in the E-W and N-S directions, respectively. The number of bays and bay widths affect the range of axial load ratios at the column ends. Analysis revealed that axial forces applied to the first-story columns ranged from 5% to 20%. Elkady and Lignos [7], Fogarty et al. [9], Wu et al. [11], and Ozkula et al. [12] demonstrated that the initial column axial force, which results from gravity loading, plays a crucial role in determining the cyclic responses of deep columns. Consequently, instead of using the shaded tributary area, 15% of the yield capacity of the column was generally applied as axial forces to the first-story columns.

The set of archetype buildings encompassed design variables addressing key issues related to the behavior of deep columns, such as the level of seismic design load, strong column weak beam (SCWB) ratio for boundary condition effects, and cyclic loading effects.

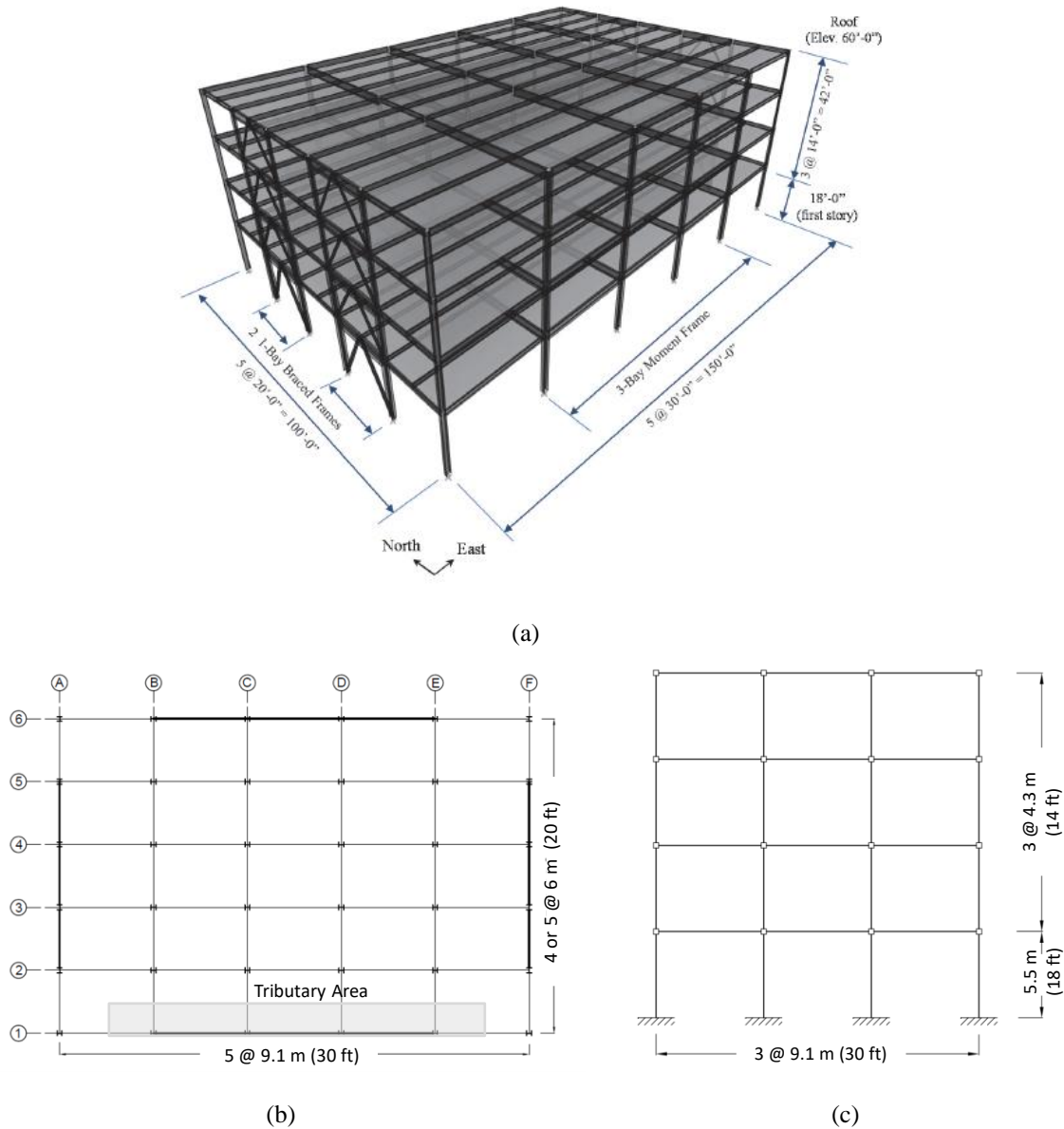


Figure 1 4-story Steel Moment Frame: (a) Isometric View of MC4 Prototype Building, (b) Plan View, (c) Elevation View

Table 1 presents the frame designations, with each frame named according to the failure mode criteria. The initial letters represent buckling modes, such as symmetric flange buckling (SFB), asymmetric flange buckling (ALB), and coupled buckling (CB). The second part of the designation provides information about the strong column weak beam ratio (SCWB), which is approximately 1 or 2. The final part of the designation offers details about the first column and beam bracing. All beams have slabs, so the top flange of the beams is braced, while the bottom flange is braced according to either AISC [17] requirements or the stiffening method proposed by Igawa and Ikarashi [24].

For example, the frame CB-SW1-CBTBS-IK has the following characteristics: CB represents coupled buckling; SW1 indicates an SCWB ratio of around 1; CBTBS denotes that the column (C) is braced at the bottom and top (BT) and the beam (B) has a slab (S); and IK signifies that stiffeners were used at the web of the beam based on the Igawa and Ikarashi method. In accordance with the failure mode classification presented by Ozkula et al. [13], Figure 2 illustrates the expected failure modes for the selected first-story column sections utilized in the study.

Finite Element Analysis of Arctype Building

Four-story moment frames were modelled with ABAQUS-CAE [15]. Four-node shell elements (SR4) were only used for the first story beams and columns while the remaining story elements were modelled with 2-node linear beam elements which adopts Timoshenko beam theory. However, Table 1 Frame Designation

since beam ends are the energy dissipation points, concentrated plasticity model suggested by Lignos and Krawinkler [5] utilized at these points.

Frame Designation	1 st Story Members		Failure Mode	SCWB Ratio	Lateral Bracing	
	Column	Beam			Column	Beam
SFB-SW1-CBTBS					Bottom & Top	with Slab & AISC Bracing
SFB-SW1-CBTBS-IK	W14×370	W21×201	SFB	1	Bottom & Top	with Slab & Ikarashi Bracing
SFB-SW1-CTBS					Only Top	with Slab & AISC Bracing
SFB-SW1-CSBS					Through the length	with Slab & AISC Bracing
ALB-SW1-CBTBS					Bottom & Top	with Slab & AISC Bracing
ALB-SW1-CBTBS-IK	W24×131	W27×94	ALB	1	Bottom & Top	with Slab & Ikarashi Bracing
ALB-SW1-CTBS					Only Top	with Slab & AISC Bracing
ALB-SW1-CSBS					Through the length	with Slab & AISC Bracing
CB-SW1-CBTBS					Bottom & Top	with Slab & AISC Bracing
CB-SW1-CBTBS-IK	W24×176	W27×114	CB	1	Bottom & Top	with Slab & Ikarashi Bracing
CB-SW1-CTBS					Only Top	with Slab & AISC Bracing
CB-SW1-CSBS					Through the length	with Slab & AISC Bracing
SFB-SW2-CBTBS	W14×500	W21×201	SFB	2	Bottom & Top	with Slab & AISC Bracing
ALB-SW2-CBTBS	W30×173	W27×94	ALB	2	Bottom & Top	with Slab & AISC Bracing
CB-SW2-CBTBS	W30×261	W27×114	CB	2	Bottom & Top	with Slab & AISC Bracing

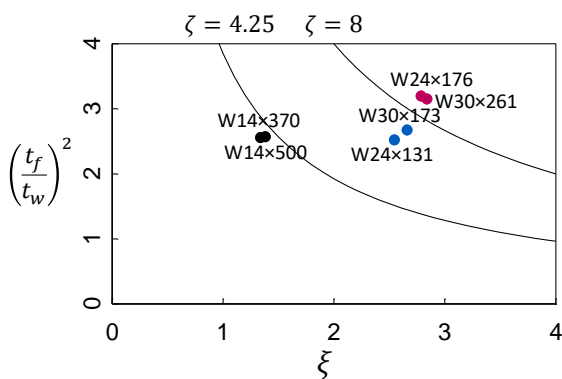


Figure 2 Buckling Modes of 1st Story Columns (Ozkula et al, 2023)

Column buckling only expected to occur at the column bases in moment frames therefore, it was crucial to model these columns with local buckling sensitive elements such as shells. However, since continuum finite element analysis are computationally expensive, by using the shell elements only at the first story columns, cut the computational effort significantly in this study.

First story RBS sections was modelled carrying out the cut of the beam flanges while at the upper floors, which beam elements were used to model columns and beams, an equivalent section with equal height but smaller width flange able to simulate the reduce section was introduced [see Figure 3(a)]. The width of the flange of equivalent

section was found starting from the definition of the plastic moment Z_{PL} as shown in Eqn. (1).

$$Z_{PL} = \frac{1}{4} [(A - t_w d)(d + d') + (t_w d^2)] \quad (1)$$

where t_w , d and A are the web thickness, the depth and the area of the section, and d' is the height of the web, respectively. Imposing Z_{PL} equal to the plastic modulus Z_{RBS} of the reduced section, Eqn. (1) can be solved in function of the area A and thus of the flange width b' of the equivalent section can be calculated.

Fix boundary conditions were applied at the frame columns while pin boundary conditions were used for leaning columns. Rigid body constraints capable to avoid possible local stress concentration and able to ensure that the relative positions of points remain constant throughout the analysis were used to tie the second floor's column top edges and the third floor's column bottom edges to a common reference point. Flexible supports with out-of-plane rotations and displacements restrained were used to prevent out of plane movement of the frame. Beam elements of the leaning columns are connected with hinges at each floor level [see Figure 3(b)].

The isotropic and kinematic hardening behaviors may both be simulated using a model from the ABAQUS-CAE material library. The hardening law, which contains both nonlinear isotropic and nonlinear kinematic hardening components, is based on the Von Mises yield surface, together with a related flow rule and its yield surface. This work made use of cyclical material features that had previously been examined by Ozkula et al. [12].

The initial geometric flaw is another element that affects the column capacity. By superimposing buckling modes generated from eigenvalue analysis, geometric flaws may be added to finite element models to cause local and global instabilities. According to AISC [17], $L/1,000$ is the

recommended global out-of-straightness imperfection. ASTM [18] limits the local web and flange defects that are typical of the production process. Initial imperfections were also included in this study.

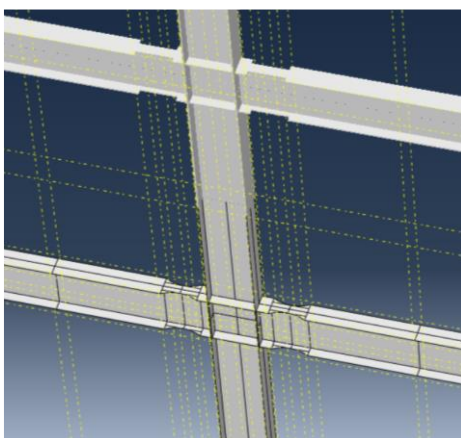
Results of Arctype Building and Discussion

The following issues were identified as the critical parameters for FE models to investigate the behavior of the first story columns in moment frames.

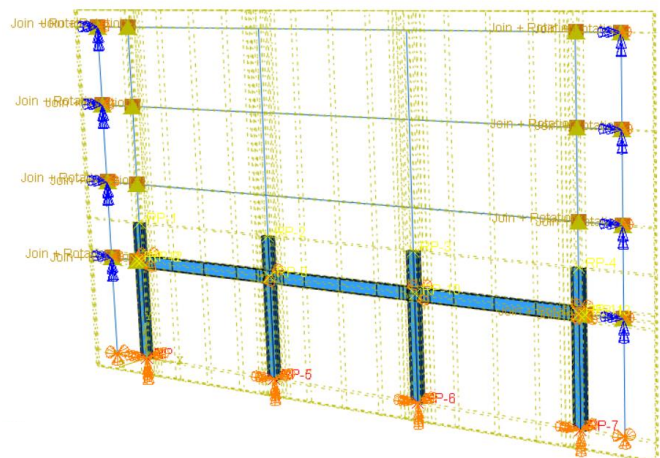
Cross Sectional Effect

Recent member-level test studies have revealed that cross-sectional differences influence column behavior and performance. The strong-axis dominance of slender sections renders them more susceptible to global buckling, such as lateral torsional buckling (LTB), while higher width-to-thickness ratios can increase the section's vulnerability to web or flange local buckling (LB). Within a specific limit of L/r_y , Ozkula et al. [13] proposed a parameter based on section slenderness properties to predict the governing buckling mode, which is utilized in this study.

Sections with high ductility and moderately low web and flange slenderness ratios often exhibit symmetric flange buckling (SFB) as the primary failure mechanism (commonly observed in shallow columns such as W12 and W14 columns). This method prevents out-of-plane, global-type member buckling by inducing in-plane plastic hinging at the column ends (or solely at the bottom end of first-story columns in a special moment frame (SMF) during practical implementation). These columns display remarkable consistency in their hysteresis response, even at higher drift levels. As section slenderness ratios increase, both flange and web local buckling modes emerge because the web is unable to provide sufficient rotational restriction to maintain fixed-ended boundary conditions for the half-width, unstiffened flange elements.



(a)



(b)

Figure 3 Finite Element Model of Frames: (a) Details RBS section, shell and beam elements, (b) Boundary Conditions of Moment Frame

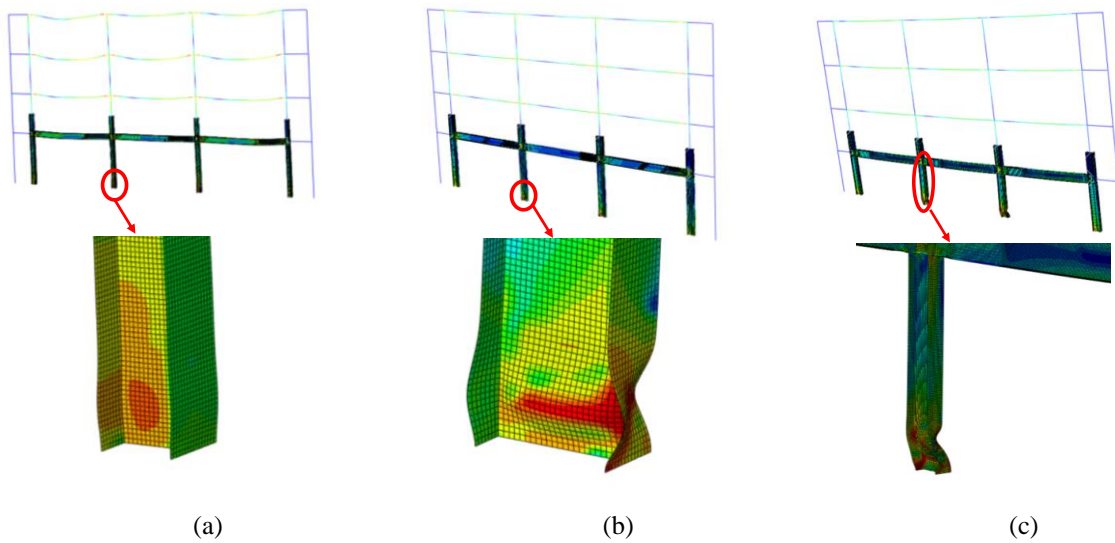


Figure 4 Effect of Cross Section: (a) SFB: W14×370, (b) ALB: W24×131, (c) CB: W24×176

The overall behavior of these sections proved to be more critical compared to symmetric flange buckling (SFB) type sections, as web and flange buckling led to a significant loss of strength when local buckling initiated. The coupled buckling (CB) mode is unique and encompasses several distinct characteristics. First, the column flanges were identified as stockier, with lower λ_f values, and highly ductile. Second, the yielding length—also known as the "plastic hinge" length—was substantial. The regions near the column ends continued to strain harden and achieve high flexural strength due to the delayed local buckling of these stockier sections, resulting in a considerably longer yielding zone at each end. Consequently, the column experienced lateral torsional buckling (LTB) due to the compressive flange's propensity to buckle along its strong axis. Third, the ductility (or capacity for inelastic deformation) was high.

Following Ozkula et al.'s [13] classifications, first-floor column sections were selected as shown in Table 1, and finite element modeling of these frames was performed to

investigate the overall behavior and axial shortening of these sections. Figure 4 displays the failure modes of the selected first-story columns, which are consistent with the observations obtained from the experiments.

Effect of Axial Force Level

Columns in moment frames are subjected to combined axial and lateral loads. Axial loads consist of the loads at the governing tributary area and additional cyclic axial forces due to global overturning moments. Recent studies have determined that the cyclic behavior of deep columns exhibits significant strength degradation as a result of local buckling, and an increase in axial load level drastically exacerbates the post-buckling strength degradation and axial shortening of the column. To examine the effect of axial force level on the moment frame, three different axial load levels ($C_a = 0.15, 0.30, 0.60$) were selected. Consistent with component-level test results, frames with low axial load levels also performed better compared to their high axial force level counterparts, as demonstrated in Figure 5.

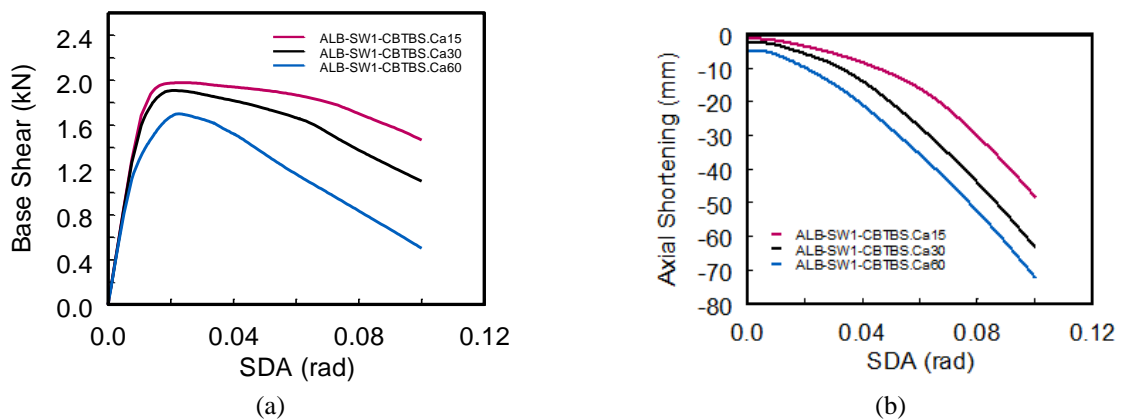


Figure 5 Effect of Axial Force Level (ALB-SW1-CBTBS): (a) Base Shear vs. SDA, (b) Axial Short. (1st Story Inner)

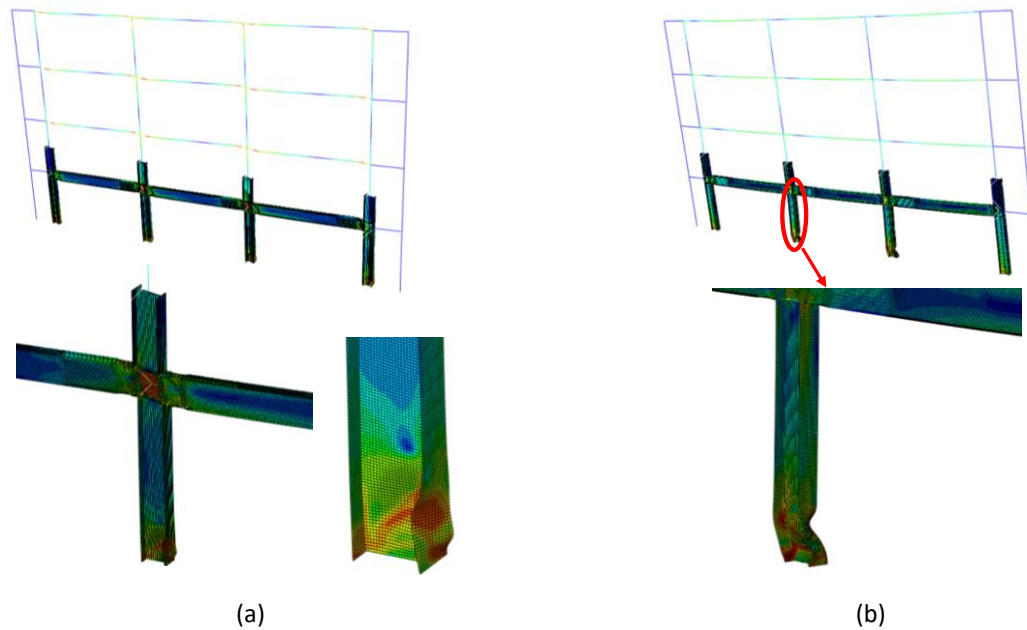


Figure 6 Buckling Mode of Section W24×176 under Monotonic and Cyclic Loading: (a) Monotonic Loading, (b) Cyclic Loading

Effect of Monotonic vs. Cyclic Loading

The performance of moment-resisting frames can be significantly influenced by load and deformation history (Lignos and Krawinkler [5], Fogarty et al [9], Ozkula et al [12], FEMA 355C [19]). A comparison of monotonic and cyclic loading effects revealed that cyclic loading exposes specimens to a substantial amount of yielding and strain hardening, which results in global instabilities (Ozkula et al, [12]). Due to the limited opportunity for significant yielding and strain hardening experienced by the column under monotonic loading, member-level column simulations indicated that out-of-plane global instability might not occur. Frame-level analyses were conducted, and the results of monotonic and cyclic loading corroborated the findings from member-level tests, as illustrated in Figure 6.

Effect of Strong Column Weak Beam Ratios

Due to inelastic deformations occurring in some stories, Scheider et al. [20] demonstrated that weak-column-strong-beam (WCSB) frames result in localized increases in seismic demands. To account for strain-hardening and mitigate the effects of concentrated plastic deformation, Nakashima and Sawaizumu [21] advised that column strength should exceed 120% of the beam's plastic moment capacity. Suita et al.'s [22] testing of a four-story moment frame on the E-Defense shaking table revealed increased beam strength due to strain hardening, slab effects, and material heterogeneity. The strong-column-weak-beam (SCWB) ratio was 1.5, and the columns were thin-walled tubes. However, a high slenderness ratio led to decreased column strength due to local buckling and reduced flexural strength. Lignos et al [5] proposed that using an SCWB

ratio greater than 2 could prevent the first story collapse mechanism of this structure.

Current AISC seismic provisions aim to control column yielding by regulating the SCWB ratio, which balances the probable plastic capacity of the column. Recent research has shown that strain hardening during inelastic deformation, material variability, composite effects, variations in geometric corrections required for transferring beam moment capacities to the column, and fluctuations in inflection points' locations in beams and columns during seismic loading indicate that the current SCWB ratios do not prevent column yielding. Consequently, the SCWB ratio of the selected sections was revised and increased to 2, as shown in Table 1. With the SCWB ratio increased to 2, larger column sections had to be chosen, although beam sizes remained the same as those in frames with an SCWB ratio of 1. Figure 7 presents a comparison of SCWB ratios for various column depths. Figure 7(b) indicates that stiffness increases as the SCWB ratio rises for ALB-type columns, while this increase is limited for SFB-type and CB-type columns. Results also demonstrated that higher post-yield stiffness was obtained with lower SCWB ratio designs. This is primarily because column local buckling reduces significantly once the SCWB ratio increases; however, due to excessive buckling at the beam ends, the post-stiffness of the overall behavior decreases more.

Effect of Beam Bracing

AISC Seismic Provisions [14] require that the lateral support for beams should be applied at all plastic hinge locations, and that additional bracing needs to be applied at regular intervals (L_b) from these locations.

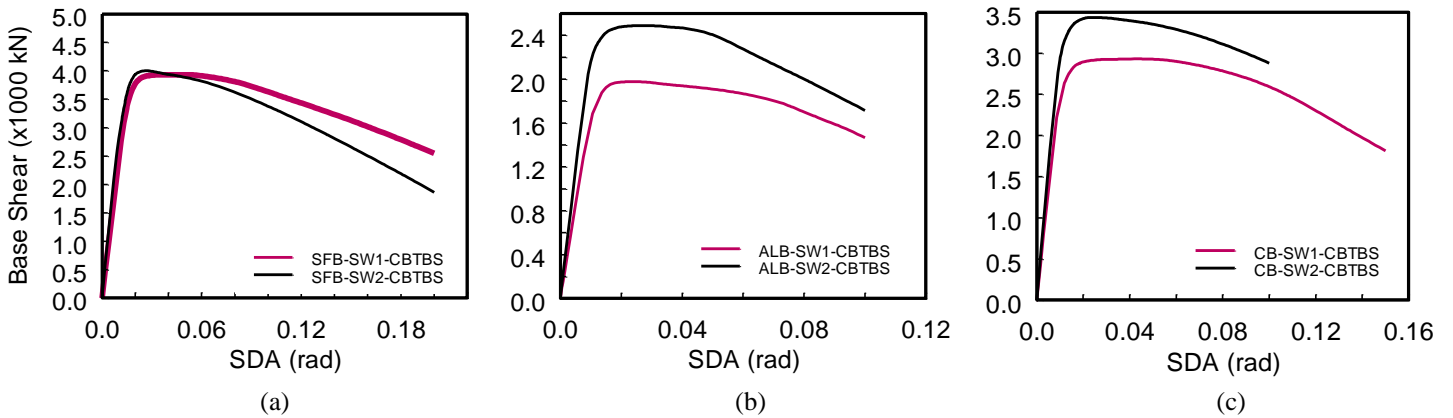


Figure 7 Effect of SCWB Ratio under Monotonic Loading: (a) SFB-SW1-CBTBS vs. SFB-SW2-CBTBS, (b) ALB-SW1-CBTBS vs. ALB-SW2-CBTBS, (c) CB-SW1-CBTBS vs. CB-SW2-CBTBS



Figure 8 Beam Bracing Samples

Trahair [23] provides an extensive overview of studies on the stability of lateral torsional buckling (LTB). Practice has led to the derivation of the form for elastic LTB for continuous bending of a doubly symmetric broad flange section under pure bending, which is a function of warping constant, C_w , torsional constant, J , the moment of inertia about the weak axis, I_y , LTB modification factor C_b .

AISC Seismic Provision requires use of stability bracing to restrain the LTB of structural steel or concrete-encased

beams subjected to flexure. Beam bracing shall have a maximum spacing as shown in Eqn.(2).

$$L_b = 0.19r_y E / (R_y F_y) \tag{2}$$

AISC 341 suggests using these bracing members near concentrated forces, changes in cross section, and other locations where analysis indicates that the plastic hinge will likely occur.

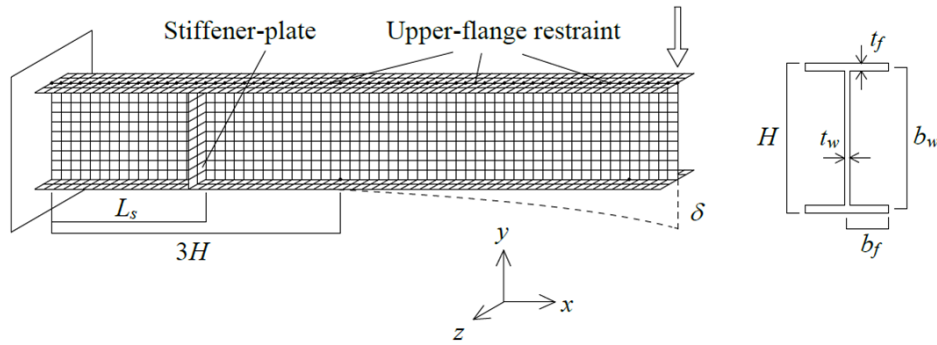


Figure 9 Analytical Model [Igawa and Ikarashi (2020)]

However, there is no requirement on the strength and capacity of the stability braces which are utilized in moment frames. Figure 8 shows some stability samples widely used in US.

Transition and rotation of the upper flange of the beam cross section is continuously and intermittently restrained by the floor slab which restraint acts effectively against the out-of-plane lateral buckling. Igawa and Ikarashi [24] proposed that using stiffener-plates is one of the effective methods of stiffening against the buckling of members rather than adding external bracing members.

Figure 9 shows the analytical model used by Igawa and Ikarashi [24] to define the location of the stiffener plate from fix-end to the stiffener plate. Igawa and Ikarashi [24] utilize an equation to predict if the buckling mode of the beam will be local or global buckling. In this study, Igawa and Ikarashi [24]’s approach is compared with the AISC defined stability bracing requirement [see Eqn.(2)] to be able to eliminate the stability braces which was shown in Figure 8.

Table 2 tabulated the expected failure modes and stiffener locations of the beams. Figure 10 and Figure 11 shows the buckling modes of beam elements (zero axial force) with section W27×114 and W21×147 which expect to have CB and ALB failure modes, respectively. Both Ozkula et al. [13] and, Igawa and Ikarashi [24] predicts the same failure modes with different approaches. Figure 10 shows the buckling modes under different bracing conditions. If the same section braced at the top flange but remains unbraced at the bottom flange [Figure 10 (b)], CB still observed however as show in Figure 12 strength degradation of this section is much more compare to the section braced at the top and bottom flanges. Once the section braced at the top and bottom flange or stiffened at the certain location defined by Igawa and Ikarashi [24], the strength degradation reduces since the local buckling delayed (see Figure 12). Figure 11(a) shows that if the unbraced length of the section is too long (30 ft), LTB mode governs. However, once the global slenderness ratio is less than 120, same section buckles in ALB mode. Unlike CB type section (W27×114), behavior of ALB type beam member (W21×147) did not affected by the bracing as shown in Figure 12.

Table 2 Beam Failure Modes and Stiffener Locations from the Beam-to-Column Joint

Frame Name	Beam Section	$\frac{WF}{\lambda_b}$	L_{se}	Ikarashi Buckling Prediction	Ozkula Buckling Prediction
SFB-SW1-CBTBS	W27X114	1.290753	101.8552	LB	CB
	W27X102	1.367448	103.4535	LB	CB
ALB-SW1-CBTBS	W27X94	1.462859	18.68677	PLB	ALB
	W27X84	1.614272	17.8222	PLB	ALB
CB-SW1-CBTBS	W21X201	1.314322	99.86283	LB	CB
	W21X147	1.639897	20.26742	PLB	ALB

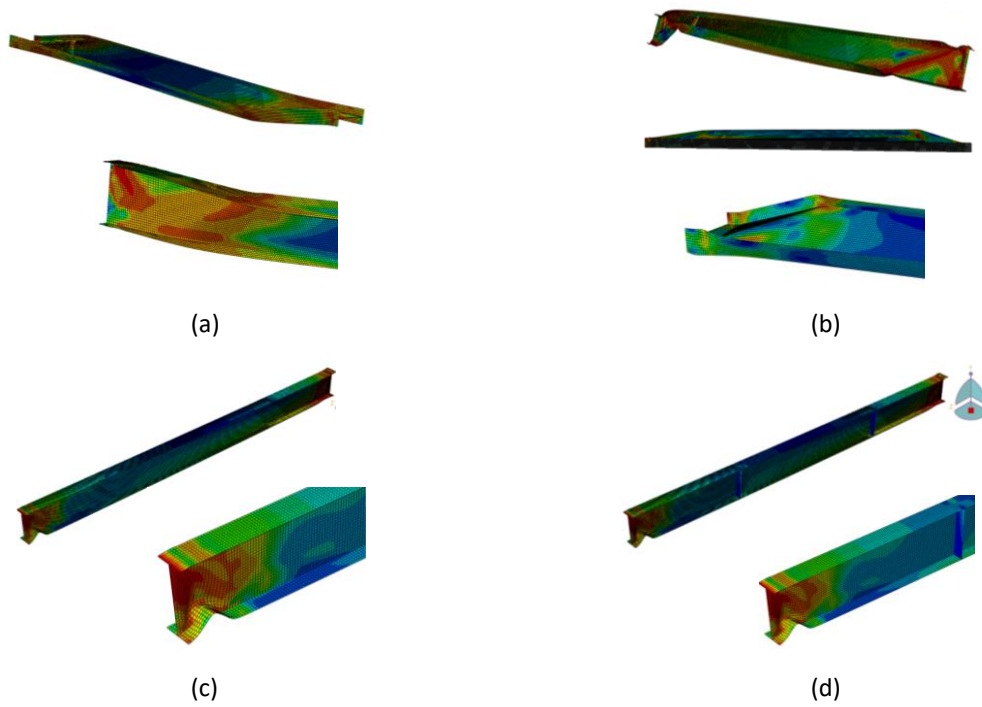


Figure 10 Bracing Conditions of Section W27×114: (a) Top & Bottom Flange Unbraced, (b) Bottom Flange Unbraced, (c) AISC Bracing, (d) Stiffener at the Web

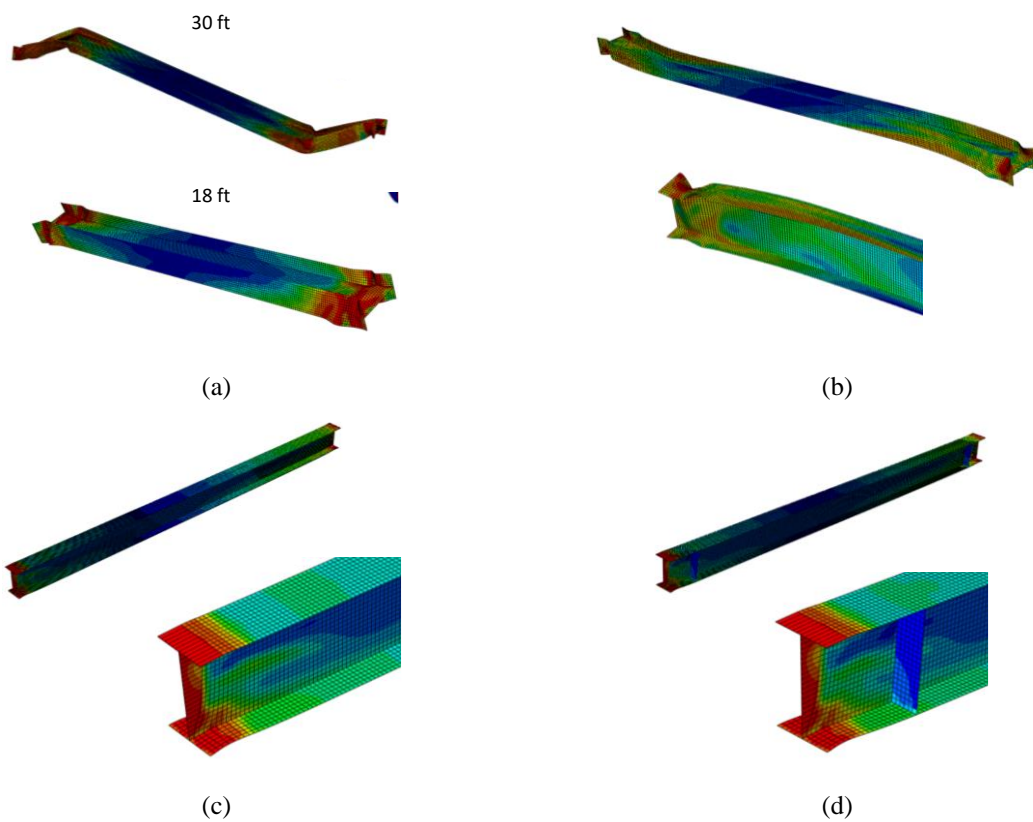


Figure 11 Bracing Conditions of Section W21×147: (a) Top & Bottom Flange Unbraced, (b) Bottom Flange Unbraced, (c) AISC Bracing, (d) Stiffener at the Web

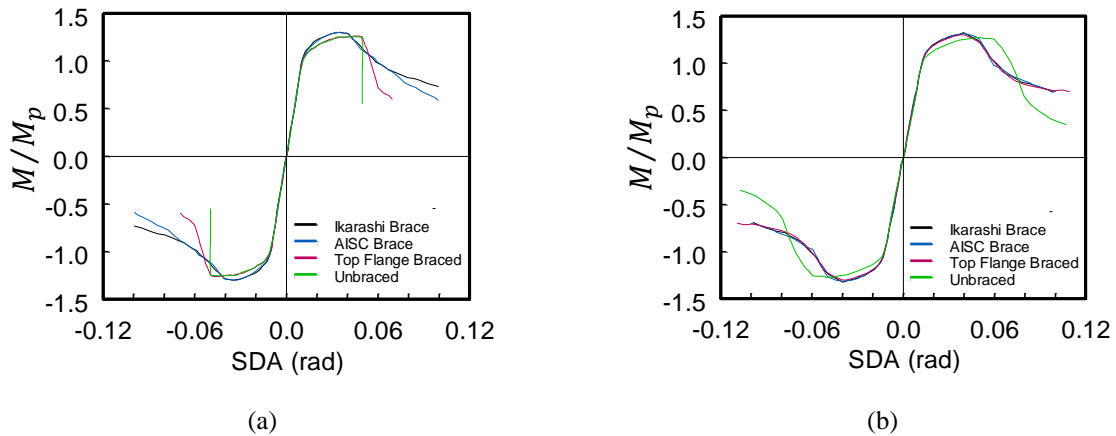


Figure 12 Brace Effect on Beam’s Post Buckling Strength and Stiffness: (a) Section W27×114, (b) Section W21×147

Figure 13 illustrates that the application of stiffeners to beam sections is only effective when ALB-type columns are utilized. As SFB-type sections do not experience

extensive local buckling and CB-type sections are subject to global buckling, beam bracing does not contribute to enhancing the post-strength of the frame.

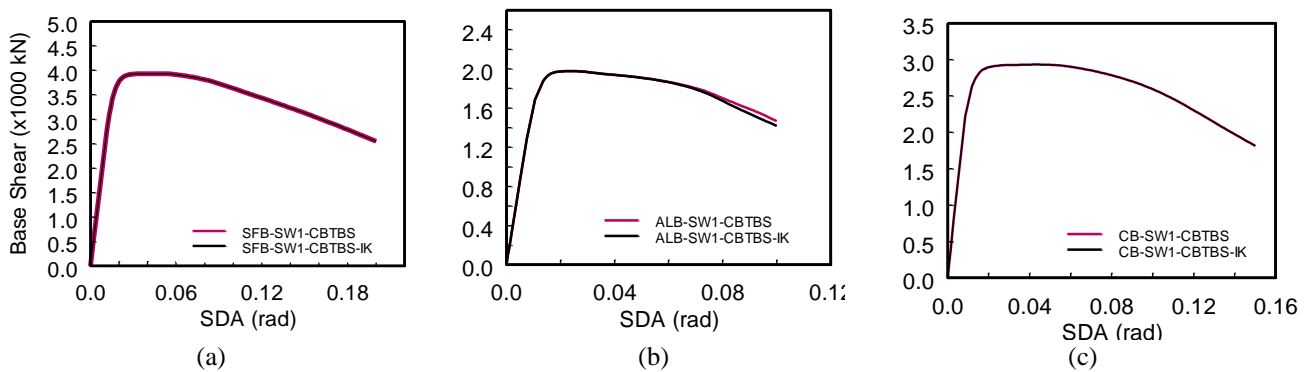


Figure 13 Effect of Beam Bracing under Monotonic Loading: Base Shear vs. SDA: (a) SFB-SW1-CBTBS vs. CBTBS-IK, (b) ALB-SW1-CBTBS vs. CBTBS-IK, (c) CB-SW1-CBTBS vs. CBTBS-IK



Figure 14 Column Bracing Samples: (a) Bracing at the Top Flange, (b) Bracing at the Top and Bottom Flange

Effect of Column Bracing

Warping constant, C_w is depend upon the square of the distance between the centroid of the flanges, deeper wide flange sections generally have higher torsional resistance, however this occurs through increased resistance to warping torsion rather than St. Venant torsion. Slender column sections may experience higher normal stresses due

to warping restraint, and therefore earlier yielding of flanges. The warping component of LTB is more severely reduced by a longer unsupported length, L_b . As a result, LTB capacity of deep columns is expected to be much more depend on the lateral support than shallow columns, which are dominated by St. Venant torsion. Even though, AISC specifies the maximum length of stability braces for beam

elements, there is no requirement for column bracing throughout the length. However, AISC Seismic Provisions [14] suggests that when the webs of the beams and column are coplanar, and column is shown to remain elastic outside of the panel zone, column flanges at beam-to-column connections shall require stability bracing only at the level of the top flanges of the beams [see Figure 14(a)]. When a column cannot be shown to remain elastic outside of the panel zone, it can be braced at the levels of both top and

bottom beam flanges as shown in Figure 14(b). Figure 15 shows that bracing column at the top and bottom flange level slightly improves the overall behavior for ALB and CB-type columns however it is not effective for SFB-type columns. Quasi static loading case also shows similar trend as shown in Figure 16. Column bracing at the top and bottom of the column also helped reducing the axial shortening of the column as shown in Figure 17.

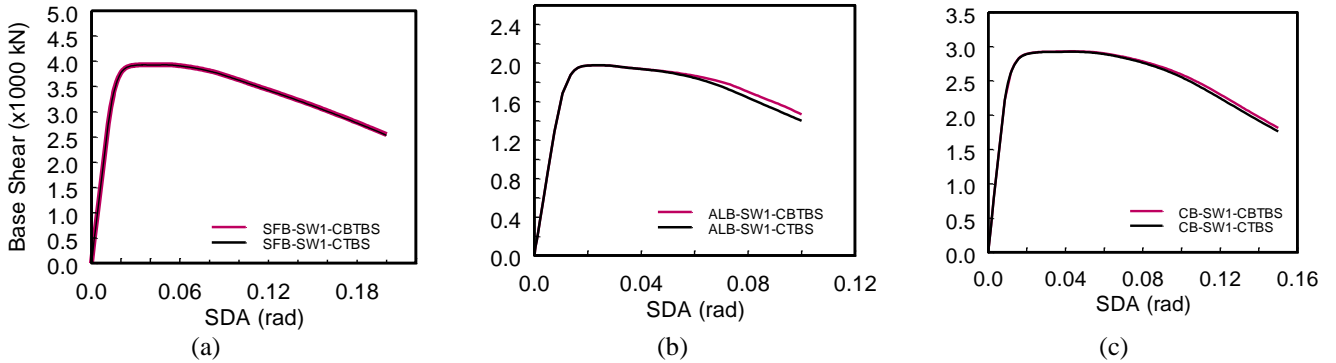


Figure 15 Effect of Column Bracing under Monotonic Loading: (a) SFB-SW1-CBTBS vs. CTBS, (b) ALB-SW1-CBTBS vs. CTBS, (c) CB-SW1-CBTBS vs. CTBS

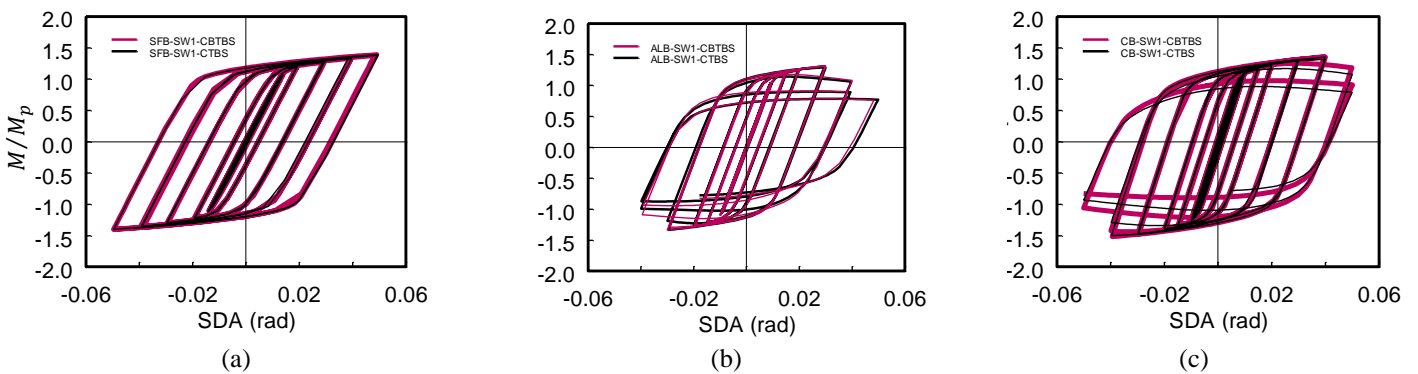


Figure 16 Effect of Column Bracing under Cyclic Loading: (a) SFB-SW1-CBTBS vs. CTBS, (b) ALB-SW1-CBTBS vs. CTBS, (c) CB-SW1-CBTBS vs. CTBS

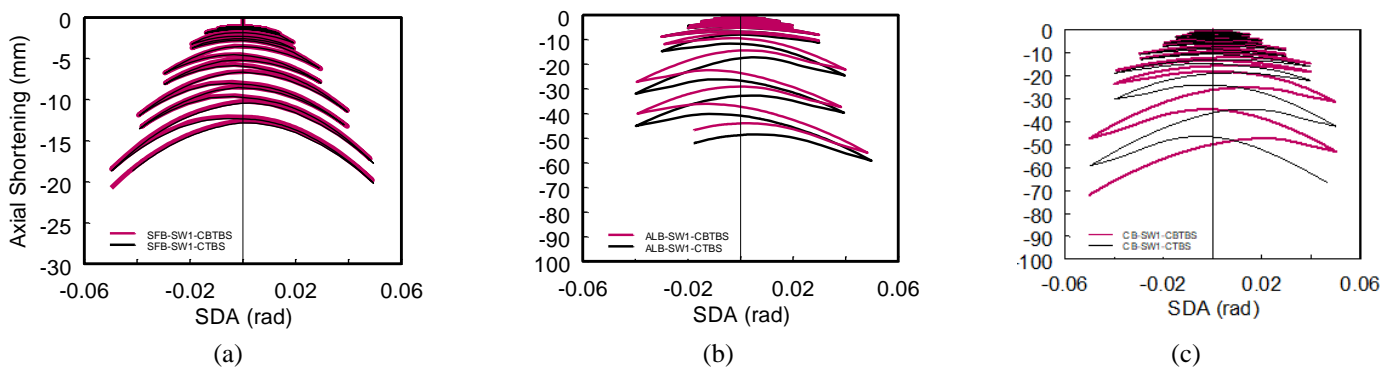


Figure 17 Effect of Column Bracing under Cyclic Loading: (a) SFB-SW1-CBTBS vs. CTBS, (b) ALB-SW1-CBTBS vs. CTBS, (c) CB-SW1-CBTBS vs. CTBS

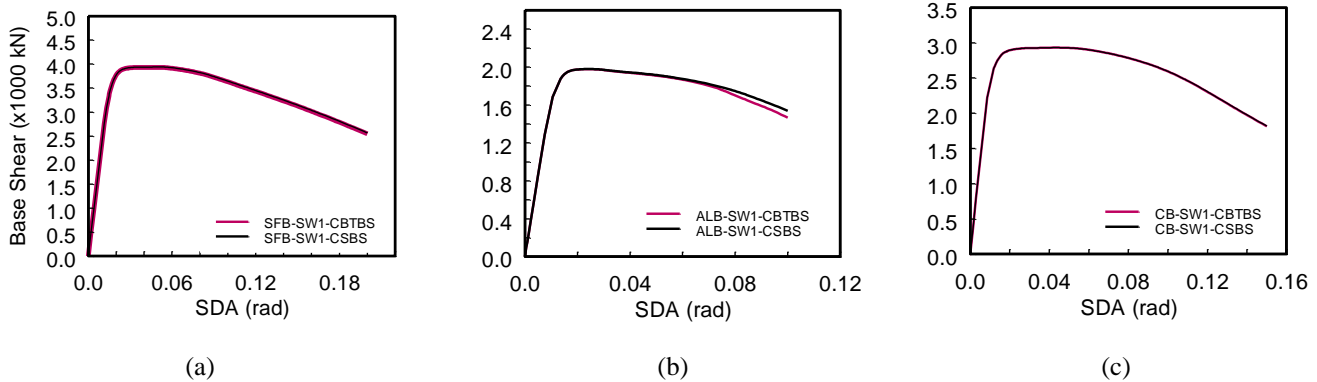


Figure 18 Effect of Column Bracing with Stiffeners under Monotonic Loading: (a) SFB-SW1-CBTBS vs. CSBS, (b) ALB-SW1-CBTBS vs. CSBS, (c) CB-SW1-CBTBS vs. CSBS

Effect of Column Bracing with Stiffeners

The impact of beam bracing through the addition of stiffeners has been previously discussed. Although the equations proposed by Igawa and Ikarashi [24] were based on analytical and experimental test results for beam sections, their approach was also applied to column stiffening in this study. Figure 18 reveals that, similar to beam bracing conditions, column bracing only enhances the performance of ALB-type sections. However, the elimination of braces contributes to a reduction in construction costs and frees up space in the beam-to-column connection regions (see Figure 14). Further research could be conducted to account for the effect of axial force in the equation.

Summary and Conclusions

The comprehensive seismic design of frames in this study has been carried out by adhering to the US design codes, specifically the ASCE 7-16 [25] and the AISC Seismic Provisions [14]. These design codes provide detailed guidelines and requirements for designing structures to withstand seismic forces to ensure their safety and stability during earthquake events. In this context, the AISC quasi-static loading is considered for the design and analysis of the frames. Quasi-static loading refers to the slow application of loads on a structure, which simulates the effects of seismic forces without the need for a full dynamic analysis. This method is particularly useful in assessing the performance of the structural system, including its strength and stiffness, under various load conditions that mimic the impact of earthquakes. The ASCE 7-16 [25] code defines the procedures for calculating seismic loads, such as the seismic base shear and story forces, which are used in the design and analysis of the structural system. The code also establishes the criteria for selecting appropriate seismic design categories, response modification factors, and system overstrength factors, which are essential in determining the structural system's seismic performance requirements.

To evaluate the behavior of deep columns compared to their shallow counterparts, multiple ABAQUS analyses were performed. A total of fifteen four-story steel SMFs were investigated, focusing on four key factors: 1) Column

bracing; 2) Beam bracing; 3) Column stiffening; and 4) Strong Column Weak Beam (SCWB) ratio. Three governing buckling modes defined by Ozkula et al. [12] were utilized in this study: symmetric flange buckling (SFB), anti-symmetric local buckling (ALB), and coupled buckling (CB) to categorize the moment frames (see Table 1 for frame designations).

From the numerical simulation results, the following conclusions can be drawn:

- Previous member-level test results demonstrated that the ratio of local slenderness ratios (λ_f/λ_w) for local buckling had a significant effect on the buckling mode (local versus global buckling), as long as the member slenderness (λ_L) is less than 120, as proposed by Ozkula et al. [12]. Frame analyses also confirmed the importance of these parameters.
- Analyses showed that the level of axial force significantly influences the plastic rotation capacity and post-buckling stiffness. The presence of axial compression produced significant local buckling and axial shortening, which created additional stresses on adjacent beams.
- Since the column did not have the chance to undergo considerable yielding and strain hardening as its cyclic counterpart did, member-level column simulations revealed that out-of-plane global instability might not occur under monotonic loading. The results of the member-level tests were validated by the frame-level analysis, as well as by the results of monotonic and cyclic loading.
- Comparing -CBTBS versus -CTBS frames showed that additional lateral bracing at the level of the top flange of the beam moderately improved the capacity of the frame for ALB-type columns, slightly for CB-type columns, and did not affect the behavior for SFB-type columns.
- Comparing -SW1-CBTBS and -SW2-CBTBS suggests that stiffness increases as the SCWB ratio increases for ALB-type columns, while this increase is limited for SFB-type and CB-type columns. Results

also showed that higher post-yield stiffness was obtained with lower SCWB ratio design. This is mainly because the column local buckling reduces significantly once the SCWB ratio increases; however, due to excessive buckling at the beam ends, the post stiffness of the overall behavior decreases more.

- Igawa and Ikarashi [24]'s approach was compared with the AISC-defined stability bracing requirement to potentially eliminate stability braces. Analysis results showed that adding stiffeners to the beams slightly improved the overall capacity of the frame but did not change the failure mode of the columns.
- Even though AISC specifies the maximum length of stability braces for beam elements, there is no requirement for column bracing throughout the length. However, AISC Seismic Provisions suggest that when the webs of the beams and column are coplanar, and the column is shown to remain elastic outside of the panel zone, column flanges at beam-to-column connections shall require stability bracing only at the level of the top flanges of the beams. Therefore, two frames (-CBTBS and -CTBS) were compared to investigate the behavior of column bracing at the top and bottom flanges. Results showed that additional lateral bracing at the level of beam bottom flanges for beam-to-column connections slightly improved the capacity of the frames with ALB and CB-type columns, while it did not affect the capacity for SFB-type columns. Therefore, it is suggested to brace columns at both the top and bottom of the beam flanges, except for the SFB-type sections.
- Although the equations proposed by Igawa and Ikarashi [24] were based on the analytical and experimental test results of beam sections, their approach was also utilized for column stiffening in this research. Results demonstrated that adding stiffeners to the column slightly improved the capacity of the ALB-type columns only.

In conclusion, this study provided valuable insights into the behavior of steel special moment frames, considering various factors such as column and beam bracing, column stiffening, and SCWB ratios. The results can guide future research and potential improvements to the AISC Seismic Provisions, with the aim of enhancing the performance of steel structures in seismic events.

Ethics committee approval and conflict of interest statement

There is no conflict of interest with any person / institution in the article prepared.

Authors' Contributions

All study conducted by the author of this paper.

Acknowledgement

This study was supported by the Scientific and Technology Research Council of Turkey (TUBITAK) through fellowship program.

References

- [1] FEMA. "Prestandart and commentary for the seismic rehabilitation of buildings", FEMA 356, *Federal Emergency Management Agency*, Washington D.C., 2000.
- [2] Ibarra L, Medina R, Krawinkler H. "Collapse assessment of deteriorating SDOF systems". Proceedings of the 12th European conference on earthquake engineering, Elsevier Science Ltd, London, September 2002.
- [3] Ibarra, L.F., Medina, R.A., and Krawinkler H. "Hysteretic models that incorporate strength and stiffness deterioration," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 34:1489-1511, 2005.
- [4] Rahnama, M., Krawinkler, H. "Effects of Soft Soil and Hysteresis Model on Seismic Demands", *John A. Blume Earthquake Engineering Center*, 1993.
- [5] Lignos, D.G., Krawinkler, H. "Deterioration modeling of steel components in support of collapse prediction of steel moment frames under earthquake loading." *Journal of Structural Engineering*, 137(11), 1291-1302, 2011.
- [6] Newell, J.D. and Uang, C.-M. "Cyclic behavior of steel wide-flange columns subjected to large drift," *Journal of Structural Engineering*, Vol. 134, No. 8, 1334-1342, ASCE, 2008.
- [7] Elkady, A., and Lignos, D.. "Dynamic stability of deep slender columns as part of special MRFs designed in seismic regions: finite element modeling." *Proc., 1st International Conference on Performance-Based and Life-Cycle Structural Engineering (PLSE)*, Hong Kong, China, 2012.
- [8] Cheng, X., Chen, Y., and Nethercot, D.A. "Experimental study on H-shaped steel beam-columns with large width-thickness ratios under cyclic bending about weak-axis." *Engineering Structures*, 49, 264-274, 2013.
- [9] Fogarty, J., and El-Tawil, S. "Collapse resistance of steel columns under combined axial and lateral loading", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 142, No. 1, ASCE, 2016.
- [10] Suzuki, Y., and Lignos, D.G. "Large scale collapse experiments of wide flange steel beam-columns." *8th International Conference on Behavior of Steel Structures in Seismic Areas*, Shanghai, China, 2015.
- [11] Wu, T.U., El-Tawil, S., and McCormick, J. "Highly ductile limits for deep steel columns," *J. Struct. Eng.* 144 (4): 04018016, 2018.
- [12] Ozkula, G., Harris, J., and Uang, C.-M. "Observations from cyclic tests on deep, wide-flange beam-columns", *Engineering Journal*, 1st Quarter, AISC, 45-59, 2017.

- [13] Ozkula, G., Harris, J., and Uang, C.-M. "Classifying cyclic buckling modes of steel wide-flange columns under cyclic loading," *Structures Congress*, 155-167, ASCE/SEI, Denver, Colorado, 2017.
- [14] AISC. *Seismic provisions for structural steel buildings*, ANSI/AISC 341-05, American Institute of Steel Construction Chicago, IL, 2015.
- [15] ABAQUS-FEA/CAE. Dassault Systemes Simulia Corp., RI, 2011.
- [16] Harris J.L, Speicher, M.S. "Assessment of first generation performance-based seismic design methods for new buildings, Volume 1: Special moment frames", *National Institute of Standards and Technology*, Feb. 2015.
- [17] AISC. *Specification for structural steel buildings*, ANSI/AISC 360-05, American Institute of Steel Construction, Chicago, IL, 2015.
- [18] ASTM. *Standard definitions of terms relating to constant- amplitude low-cycle fatigue testing*, ASTM Standard E466, 2003.
- [19] FEMA. "State of the art report on system performance of steel moment frames subject to earthquake ground shaking", FEMA 355C, *Federal Emergency Management Agency*, Washington D.C, 2000.
- [20] Schneider, S.P., Roeder, C.W., Carpenter, J.E., "Seismic behavior of moment-resisting steel frames: experimental study", *Journal of Structural Engineering*, 119(6), 1885-1902, 1993.
- [21] Nakashima, M., Sawaizumi S., "Column-to-beam strength ratio required for ensuring beam-collapse mechanisms in earthquake responses of steel moment frames", *Proceeding of the 12th World Conference*, 2000.
- [22] Suita, K., Yamada, S., Tada, M., Kasai, K., Matsuoka, Y., and Sato, E. "Results of recent e-defense tests on full-scale steel buildings: Part 1 – Collapse experiment on 4-story moment frame," *Proceedings Structures Congress*, Vancouver, Canada, 2008.
- [23] Trahair, N.S., "Flexural-Torsional Buckling of Structures", *Taylor and Francis*, 1993.
- [24] Igawa, N. and Ikarashi, K. "Effect of stiffener position on buckling behavior of H-shaped steel beam with upper flange restraint", *Thesis*, Department of Architecture and Building Engineering, Tokyo Institute of Technology, Japan, 2020.
- [25] ASCE. "Minimum design loads for buildings and other structures", ASCE 7, *American Society of Civil Engineers*, Reston, VA, 2016.



Investigation of Favorable Neural Network Methods to Estimate Traffic Components

Sedat ÖZCANAN

Şırnak University, Civil Engineering Department, sozcanan@sinak.edu.tr, Orcid No: 0000-0002-8504-7611

ARTICLE INFO

Article history:

Received 16 December 2022
Received in revised form 1 May 2023
Accepted 5 May 2023
Available online 20 June 2023

Keywords:

Estimate traffic components,
Artificial neural network,
FFBPNN, RBFNN, GRNN, MVLR

Doi: 10.24012/dumf.1219818

* Corresponding author

ABSTRACT

Neural networks provide the opportunity to estimate specific components of engineering problems. They are decomposed complex problems into different parts. Thus, it can be easy to compete with each of them through neural networks. In this paper, it was purposed to estimate the average speed of a 6-line road's cross-section by observed traffic variables, such as numbers of vehicles and occupancy values, using radial basis function neural network (RBFNN), generalized regression neural network (GRNN) and the feed-forward back propagation neural network (FFBPNN) models. A comparison was fulfilled between different neural networks and checked against multivariate linear regression (MVLR), a conventional statistical model. After each simulation of neural networks, results show that different forecasts were obtained under the same conditions. The best forecasting is made by FFBPNN, GRNN, and RBFNN, respectively. When compared with multivariate linear regression (MVLR), FFBPNN performs better than MVLR, but GRNN and RBFNN perform lower than it.

Introduction

The principle of artificial neural networks (ANN) is based on the biological nervous system. The main resource is the human brain and how it processes information. The human brain consists of a very large number of neurons, which of them are completely interconnected. The basic element of each ANN is the neuron. The basic scheme of the neuron is shown in Figure 1. The connection of elements in multiple ways causes different architectures of neural networks [1-2].

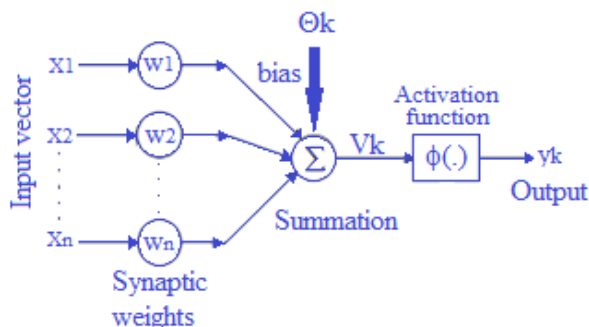


Figure 1. Nonlinear model of a neuron.

The model of a neuron used to create artificial neural networks is shown in Figure 1's block diagram. The bias b_k affects the activation function's net input by raising or reducing it. The pair of equations below can be written to represent a neuron k [2]:

$$u_k = \sum w_{ki}x_i \quad (1)$$

$$y_k = \phi(V_k + \theta_k) \quad (2)$$

Here, x is the input stimulus, w_k is the synaptic weight of the k neuron, V_k is the linear collector output based on the input stimulus, θ_k is the bias, $\phi(\cdot)$ is the activation function, and y_k is the neuron's output stimulus.

In most cases, short-term traffic flow predictions were made using neural networks for traffic engineering [3–7]. The backpropagation learning algorithm and feed-forward neural networks were most often utilized, along with hybrid methods like neuro-fuzzy and Kohonen maps [8]. Additionally, neural networks were used to estimate the typical travel duration [9–10]. Also, the efficiency of public transportation was predicted by Costa and Markellos in 1997 using neural networks [11]. Furthermore, Celikoglu (2006) used extended regression neural networks and radial basis functions to specify non-linear utility functions for

simulating travel mode choice [12]. A radial basis function was utilized by Celikoglu and Cigizoglu in 2007 to estimate the daily trip flows of public transportation [13].

Recently, there have been studies in which different artificial neural network methods are used to solve several transportation problems. These studies examine the use of artificial intelligence technologies and deep learning methods in different aspects of transportation systems including traffic forecasting [14, 15, 16, 17, 18, 19, 20], bike-sharing demand forecasting [21], vehicle destination forecasting [22, 23], traffic flow and speed estimation [24, 25], traffic signal timing [26] and travel time estimation [27], and traffic accident estimation [28]. Most of the research has been carried out using graphical neural networks, deep learning methods, various machine-learning techniques, and different feature extraction methods, especially developed using data with a graphical structure. While these studies show the development of applications of artificial intelligence technologies in transportation systems, they can also guide future research and projects.

The neural networks also do have not prior knowledge of the nature of non-linear functions, but they can approximate solutions. The neural networks are decomposed complex problems into different components. Thus, it can be easy to compete with each of them through neural networks. In this work, it was purposed to estimate the average speed of a 6-line road's cross-section by observed traffic variables, such as numbers of vehicles and occupancy values, using radial basis function neural network (RBFNN), generalized regression neural network (GRNN) and the feed-forward back propagation neural network (FFBPNN) models. A comparison was fulfilled between different neural networks and checked against multivariate linear regression (MVLN), a conventional statistical model. The flow chart of the study is given in Figure 2.

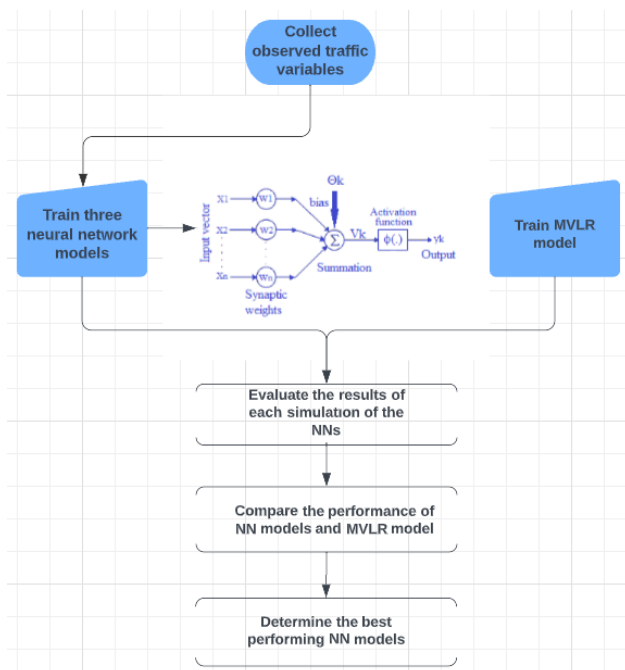


Figure 2. The flow chart of the study

This paper has the following structure. After the introduction, the methodology is summarized in the second section. The comparison of ANN methods for the applied model is presented in the fourth section. Finally, discussion of findings and potential future extensions in the conclusion section.

Methodology

Neural network methods

In the introduction section above, the general working principle of neural networks was tried to be explained by giving the diagram model. For the FFBPNN, GRNN, RBFNN and MVLN methods to be used in this study, the code was written in the MATLAB 2022b [29] and toolbox algorithms/functions were used for the related methods. These algorithms/functions are “*feedforwardnet*”, “*newgrnn*”, “*newrb*”, “*mvregress*” for FFBPNN, GRNN, RBFNN and MVLN, respectively. Detailed theories of the methods involved will not be given here. However, details about these methods can be obtained from the study given in [12].

Error evaluation metrics

In this study, mean-square error (MSE) and R^2 metrics were used to detect and evaluate error values. One of these commonly used metrics, the MSE formula is given in Equation (3).

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (3)$$

Here, n is the number of variables, y observed values, and \hat{y} predicted values. A measure of an estimator's quality is the MSE. It is always a positive number that becomes smaller as the error gets closer to zero since it is derived from the square of the Euclidean distance.

Another metric used here is R^2 given in Equation (4). The metric also named the coefficient of determination which is the percentage of the dependent variable's variance that can be predicted by the independent variable (s).

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{res}}{SS_{tot}} \quad (4)$$

Here, SS_{res} is residual sum of squares and SS_{tot} is total sum of squares.

Traffic data and analysis

The data of this study were obtained from the sum of the 24-hour-daily Remote Traffic Microwave Sensor (RTMS) data between 01-28 February 2019 in the European side of Istanbul Fatih Sultan Mehmet Bridge before the tollbooths section of the TEM highway. The data was measured with the detector every other 2 minutes at the 6-line road's cross-section during a month. 19388 data were obtained from these observations. A few of these data, edited and processed for analysis, are given as an example in Table 1. The data involves long vehicle (V_L) numbers, private car (V_p) numbers, occupancy (O) values in percent, and speed

(S) values. Due to the calibration of the detector, a few speed data, that measured during the empty line as 240 km/h, was required adjustment. Otherwise, the time series characteristic of data failed. In the estimation problem, 12 input vectors and 1 output vector are purposed. The first 6 input vectors consist of V_L and V_p numbers of per line that are added as in Equation 5. The second 6 input vectors consist of occupancy values in percent per line. The final vector is the output one that calculated the average speed value of the road's cross-section.

$$V_{c(1-6)} = V_{p(1-6)} + V_{L(1-6)} \tag{5}$$

Table 1. Edited and processed data ready for analysis.

Data no.	V_{p1+} V_{L1}	V_{p2+} V_{L2}	...	V_{p6+} V_{L6}	O_1	O_2	...	O_6	S
1	0.16	0.39	...	0.32	0.01	0.05	...	0.02	0.82
2	0.33	0.43	...	0.37	0.02	0.06	...	0.03	0.81
3	0.23	0.33	...	0.32	0.01	0.06	...	0.02	0.81
4	0.19	0.36	...	0.34	0.02	0.05	...	0.03	0.78
5	0.16	0.30	...	0.37	0.01	0.04	...	0.02	0.79
6	0.29	0.37	...	0.26	0.02	0.06	...	0.01	0.82
7	0.29	0.40	...	0.36	0.02	0.06	...	0.02	0.81
8	0.14	0.33	...	0.33	0.01	0.05	...	0.02	0.84
9	0.19	0.46	...	0.34	0.01	0.07	...	0.02	0.83
10	0.19	0.46	...	0.33	0.02	0.06	...	0.02	0.79
11	0.16	0.45	...	0.14	0.01	0.06	...	0.01	0.84
12	0.21	0.33	...	0.25	0.02	0.05	...	0.01	0.80
13	0.23	0.54	...	0.25	0.01	0.07	...	0.02	0.89
14	0.23	0.38	...	0.28	0.01	0.05	...	0.02	0.82
15	0.30	0.40	...	0.29	0.02	0.06	...	0.02	0.80
16	0.34	0.49	...	0.38	0.03	0.07	...	0.03	0.81
...
19386	0.14	0.21	...	0.17	0.02	0.02	...	0.01	0.74
19387	0.11	0.26	...	0.20	0.01	0.04	...	0.01	0.74
19388	0.17	0.25	...	0.26	0.02	0.03	...	0.01	0.78

V_p : private car V_L : long vehicle O: occupancy S: speed

In addition, the central, dispersion and skewness parameters of the data given in Table 1 were calculated. Maximum-minimum values, mean, standard deviation and skewness values of the vehicles are given in Table 2. These values are given in Table 3 and Table 4, respectively, for the occupation and velocity values.

In the problem, the time-series model was not used. The random utility model (RUM) applied that one variable (average speed) is estimated by two other different variables (vehicle numbers and occupancy values) [10, 30]. For comparison, the speed value, obtained from the prediction of the NNs relationship as in $S: f((V_L+V_p), O)$, is compared with the observative one. So, the appropriate configurations of RBFNN, GRNN, and FFBPNN are investigated by simulation. Results are then compared with observations and another comparison by MVLRL.

Table 2. Statistical information on the analyzed data set of vehicle numbers.

Statistical V.	Vehicle (V_L+V_p)					
	Line 1	Line 2	Line 3	Line 4	Line 5	Line 6
X_{min}	0	0	0	0	0	0
X_{max}	70	87	83	75	75	76
Mean	15.51	26.42	25.18	26.40	29.94	28.48
Stand. dev.	12.59	16.72	16.69	16.70	18.10	20.32
Skewness	1.26	0.28	0.37	0.12	-0.16	0.00

Table 3. Statistical information on the analyzed data set of occupancy.

Statistical V.	Occupancy (O) (%)					
	Line 1	Line 2	Line 3	Line 4	Line 5	Line 6
X_{min}	0	0	0	0	0	0
X_{max}	100	100	94	90	83	60
Mean	3.28	7.19	8.52	9.04	7.41	4.68
Stand. dev.	6.56	12.18	12.81	12.01	10.05	7.01
Skewness	4.68	4.07	3.88	3.68	3.87	4.08

Table 4. Statistical information on the analyzed data set of speed.

Statistical V.	Speed (S)					
	Line 1	Line 2	Line 3	Line 4	Line 5	Line 6
X_{min}	0	2	0	2	5	9
X_{max}	114	126	134	131	134	147
Mean	71.50	76.96	82.18	77.04	91.51	104.67
Stand. dev.	16.58	17.29	21.27	21.42	19.84	19.52
Skewness	-0.92	-2.49	-1.71	-1.25	-2.35	-1.99

In order to get a better performance, the data of analyses are scaled/normalized between 0 and 1 as which is divided by maximum one. Simulations are written in MATLAB 2022b version [29] and run on a computer with the following properties: Intel(R), Core(TM) i7-4720HQ, CPU@2.60GHz, RAM:16 GB, AMD-Radeon Graphics, 1.0 TB HDD.

Neural networks analyses

Feed-forward back-propagation neural network (FFBPNN)

The FFBP neural network structure consisted of 6 input layers (3-vehicle numbers and 3-occupancy values) and 6 hidden layers (3-vehicle numbers and 3-occupancy values) and one output layer (speed values). Firstly, FFBPNN was run with 19388 data; there was seen high incidence of correct estimation as shown in Figure 3. Since the figure is too long for the whole data, it is clipped and given here for a part of it.

In the figure, it is seen that the velocities decrease at certain intervals. The reason for the decreases is the congestion during the traffic peak hours during the day, as the traffic data consists of observations made around the clock. During the day, the peak hours are 7-9, which is the morning commute, and 17-20, which is the evening after work. During these peak hours of traffic, there may be traffic congestion, especially at bridge entrances and important arteries. This congestion brings along speed drops. In addition, in Figure 4, there is a concentration at certain intervals. Because the speed drops due to peak hour traffic are around 20-30 km/h, which is the reason why the speeds are concentrated at that point. Apart from that, it is seen that it is concentrated between 70-110 km/h points, which we can call the average traffic flow speed.

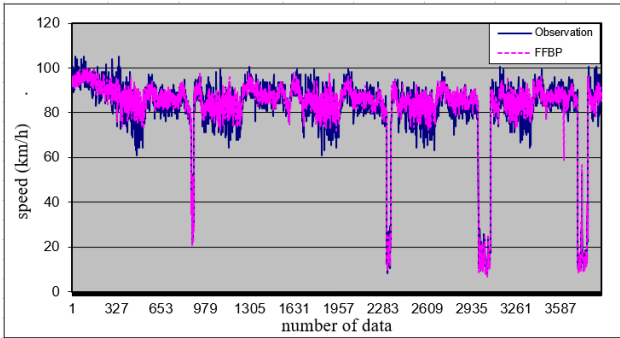


Figure 3. Comparison of FFBP neural network estimation with the observation.

Also, mean square error (MSE) = 20.39 and the coefficient of determination (R^2) = 0.9323 value and regression line can be explained with high accuracy estimating of speed according to observative values as drawn in scatter plot in Figure 4. Moreover, during the analysis, it was understood that changing the input layer and hidden layer node numbers do not affect the estimating performance so much.

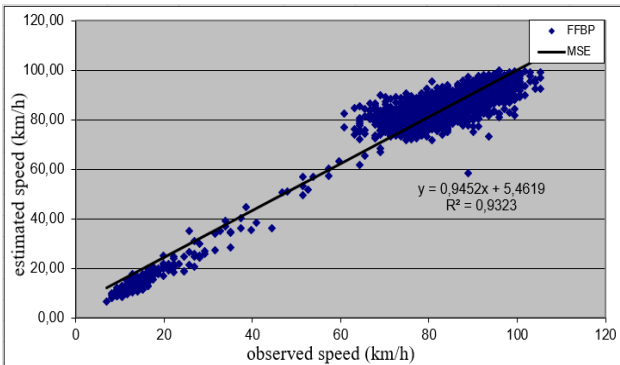


Figure 4. Scatter plot of FFBP neural network estimation.

After the first running, FFBPNN was run with 1250 data, this value is a commonly shared value of RBFNN, GRNN, and FFBPNN analyses. For comparison on an equal basis, that value was selected. Because other than FFBPNN, RBFNN and GRNN could not analyze all data. The data that the three of them ran together was 1250. The range in which the velocity decreases in the figure is from the peak hour congestion in the observed highway region, as explained above. Similar speed drops are seen in other Figures in the next sections as the same data is used.

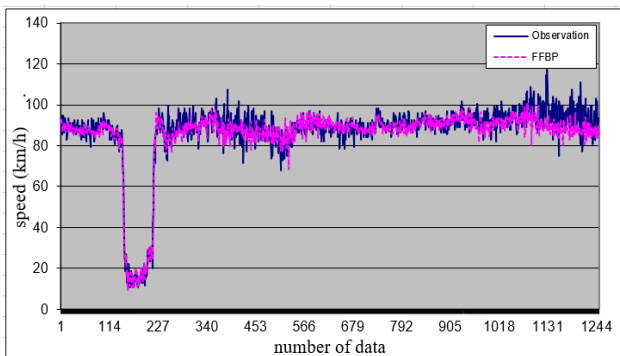


Figure 5. Comparison of FFBP neural network estimation with the observation.

In despite of lower data, analyzing of FFBPNN seems to be closely approximated to observation data as drawn in Figure 5 and Figure 6. The MSE = 24.68 and R^2 = 0.9235 for FFBPNN estimation. Although the observation data decreased from 19388 to 1250, a very successful estimation was made with a very small decrease in the R^2 value.

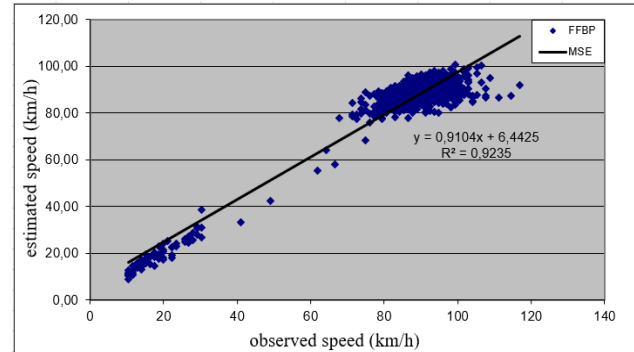


Figure 6. Scatter plot of FFBP neural network estimation.

Radial basis function neural network (RBFNN)

The RBF neural network structure consisted of 6 input layers (3-vehicle numbers and 3-occupancy values) and 6 hidden layers (3-vehicle numbers and 3-occupancy values) and one output layer (speed values).

The RBF neural network could not run for all data (19388). So, we needed to restrict it. The maximum data that RBFNN was run is 1250. The result shows the RBF neural network estimation was not approximated to the observation. As shown in Figure 7, estimating values line does not fit the observative one. Also, the MSE = 211.21 and the coefficient of determination (R^2) = 0.3087, and the regression line are highly different as they are seen in Figure 8.

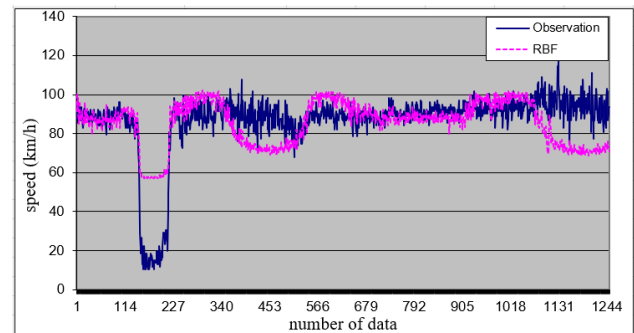


Figure 7. Comparison of RBF neural network estimation with the observation.

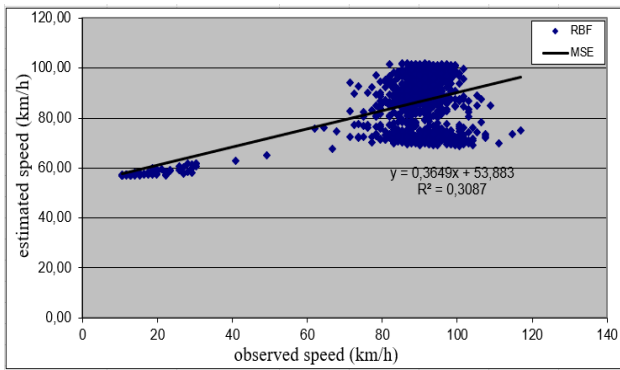


Figure 8. Scatter plot of RBF neural network estimation.

Generalized regression neural network (GRNN)

The GRNN structure also consisted of 6 input layers (3-vehicle numbers and 3-occupancy values) and 6 hidden layers (3-vehicle numbers and 3-occupancy values) and one output layer (speed values).

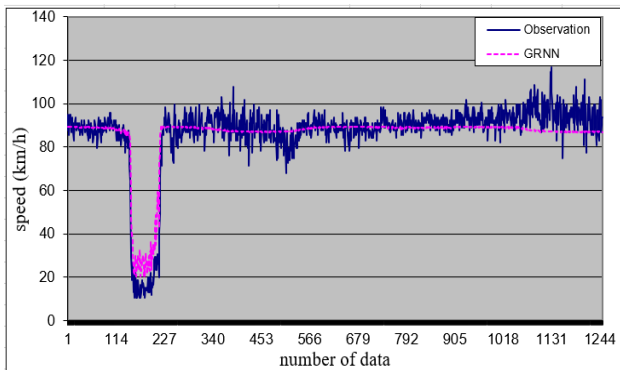


Figure 9. Comparison of GRNN estimation with the observation.

Similar to the RBFNN application, GRNN analyzing could not run the all data. It implemented only 1250 data. But, as a result, forecasting of GRNN was approximated to observed data as in Figure 9. In addition, the coefficient of determination (R^2) = 0.8792 value, regression line in Figure 10, and MSE = 47.26 all indicate that the estimation is highly accurate.

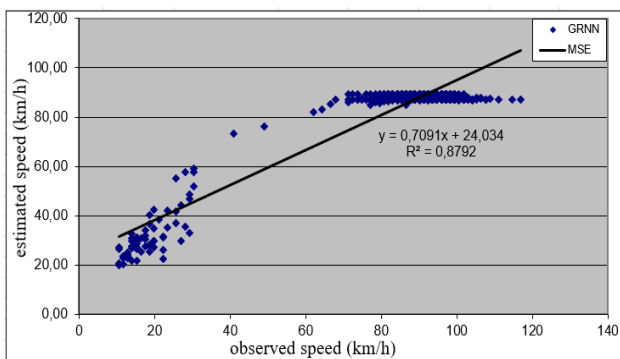


Figure 10. Scatter plot of GRNN estimation.

Multivariate linear regression (MVLr)

MVLr is used to determine the relationship between dependent and independent variables. Due to the correlation

between the variables, the relationship is considered to be linear. This technique is used to forecast the behavior of the response variable based on its related predictor factors after multivariate regression has been performed to the dataset. Therefore, in this study, MVLr was used to compare NNs methods.

Multivariate linear regression (MVLr) output shows high consistency with the observative data as shown in Figure 11 and the mean square error (MSE) is 24.54. Besides, the coefficient of determination (R^2) = 0.9116 as shown in Figure 12.

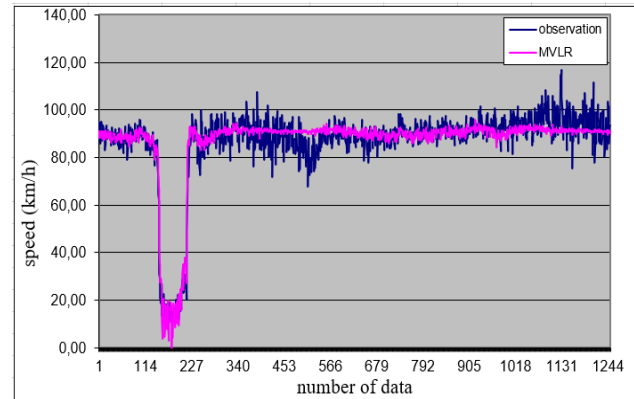


Figure 11. Comparison of MVLr estimation with the observation.

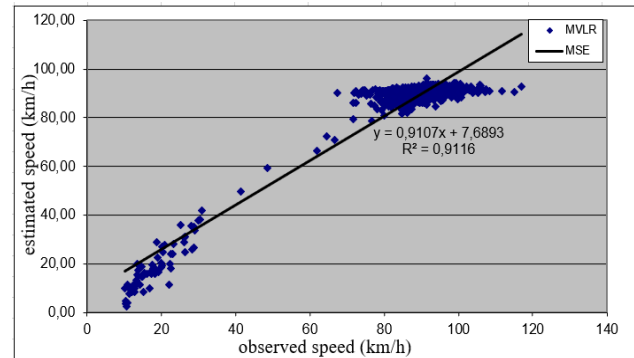


Figure 12. Scatter plot of MVLr estimation.

Comparison of the methods

After each simulation of neural networks, different forecasts were obtained under the same conditions. The best forecasting was made by FFBPNN and GRNN and RBFNN, respectively. However, when MVLr compare with NNs, the performance of MVLr is higher than GRNN and RBFNN, but lower than FFBPNN as it is shown in Figure 13. Moreover, in Table 5, the rankings for the methods are given as a result of the comparison made depending on the MSE and R^2 values.

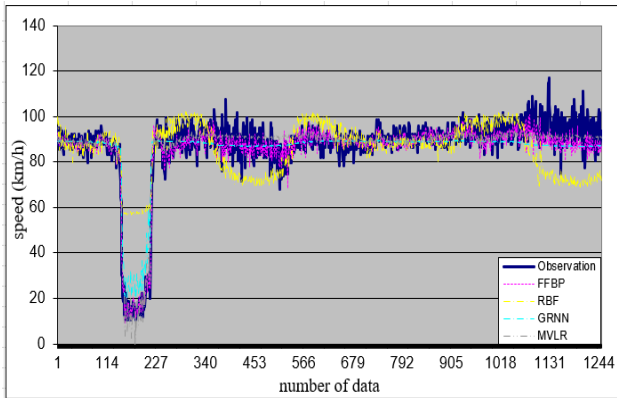


Figure 13. Comparison of all methods.

The FFBP neural network only one that could run the all data. In spite of lowering data from 19388 to 1250, there is a little difference between high accuracy estimation as shown in Figure 4 and Figure 6. Although the data decreased by almost 94%, the prediction success remained almost the same as can be seen from the R^2 value.

Since the features of the computer used in this study are not capable of performing big data analysis for all NN methods, the data set has been reduced. Although this is one of the limitations of the study, it is especially worth emphasizing here that FFBPNN performs better for small data. As the number of data increases, the performance of the methods used may change.

Table 5. Forecasting methods and success rankings.

Comparison of NNs and MVLN				
Rankings	Analyses Type	MSE	R^2	
#1	FFBPNN	24.68	0.9235	
#2	MVLN	26.54	0.9116	
#3	GRNN	47.26	0.8792	
#4	RBFNN	211.2	0.3087	

Conclusions

In this study, data estimation of neural network methods, which are widely used in traffic engineering and autonomous systems, has been investigated. For this, the traffic data obtained as a result of the observation was used. As a result of the analyzes made for FFBPNN, RBFNN and GRNN, the following results were obtained;

- When compare multivariate linear regression with NNs, performance of MVLN higher than GRNN and RBFNN, but lower than FFBPNN.
- The FFBP is the only neural network that can run all data. It is a great advantage that it can run large data without a high-specification computer infrastructure and predicts with high accuracy.
- The R^2 value of the estimation made with 19388 data in FFBPNN was 0.9323, and the R^2 value of the estimation made with 1250 data was 0.9235. As can be seen, although the data set was reduced by 94%, the estimation accuracy was almost the same.

- Due to the properties such as easy application, short training duration and coding in a short time, and high accuracy estimation, FFBP is more feasible than the other neural networks applications to conventional stochastic and statistical methods in estimating studies.
- In future studies, research can be made for neural network methods that have been popular recently such as probabilistic, and convolutional neural networks.

Ethics Committee Approval

There is no need to obtain permission from the ethics committee for the article prepared.

Conflict of Interest Statement

There is no conflict of interest with any person / institution in the article prepared.

References

- [1] M. Oravec, M. Petráš, F. Pilka, "Video Traffic Prediction Using Neural Networks," *Acta Polytechnica Hungarica*, Vol. 5, No. 4, 2008.
- [2] C.M. Bishop, *Neural Networks for Pattern Recognition*; Oxford University Press: Oxford, UK, 1995.
- [3] L. Mussone, and L. Florio, "Neural network models for classification and forecasting of freeway traffic flow stability," *Control Engineering Practice*, 4, pp. 153-164, 1996.
- [4] M. S. Dougherty, and M. R. Cobbett, "Short term inter urban traffic forecasts using neural networks" *International Journal of Forecasting*, 13, pp.21-31, 1997.
- [5] M. Dougherty, M. Van Der Voort, and S. Watson, "Combining Kohonen maps with ARIMA time series models to forecast traffic flow" *Transportation Research Part C*, 4, pp. 307-318, 1996.
- [6] Chen, H. and Grant Muller, S. "Use of sequential learning for short term traffic flow forecasting" *Transportation Research Part C*, 9, pp. 319-336, 2001.
- [7] H. Yin, S. C. Wong, J. Xu, and C. K. Wong, "Urban traffic flow prediction using a fuzzy –neural approach" *Transportation Research Part C*, 10, pp. 85-98, 2002.
- [8] G. Salvo, G. Amato, P. Zito, "Bus speed estimation by neural networks to improve the automatic fleet management" *European Transport \ Trasporti Europei* n. 37 (2007): 93-104, 2007.
- [9] M. F. Tafti, "The application of artificial neural networks to anticipate the average journey time of traffic in the vicinity of merges" *Knowledge-Based Systems*, 14, pp. 203-211, 2001.
- [10] La Franca, L., Migliore, M., Salvo, G. and Carollo, F. (2004) "The automatic vehicle monitoring to improve the urban public transport management", *XI convegno CODATU Towards a more attractive Urban Transportation*, Bucharest, 22-24 aprile 2004.
- [11] A. Costa, and R.N. Markellos, Evaluating public transport efficiency with neural network models.

- Transpn Res.-C*, Vol.5, No. 5, pp. 301-312, 1997. [https://doi.org/10.1016/S0968-090X\(97\)00017-X](https://doi.org/10.1016/S0968-090X(97)00017-X)
- [12] H.B. Celikoglu, "Application of radial basis function and generalized regression neural networks in non-linear utility function specification for travel mode choice modelling", *Mathematical and Computer Modelling*, 44 (2006), pp. 640–658, 2006.
- [13] H. B. Celikoglu, and H. K. Cigizoglu, "Modelling public transport trips by radial basis function neural networks", *Mathematical and computer modelling*, pp. 480-489, 2007.
- [14] W. Jiang, "Cellular traffic prediction with machine learning: A survey," *Expert Systems with Applications*, vol. 201, p. 117163, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.117163>.
- [15] W. Jiang and J. Luo, "Graph neural network for traffic forecasting: A survey," *Expert Systems with Applications*, vol. 207, p. 117921, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.117921>
- [16] A. Gedik, "Short-term Traffic Volume Prediction for the Merging Roads by Artificial Neural Network," *El-Cezeri Journal of Science and Engineering*, vol. 7, no. 3, pp. 1496-1508, 2020. DOI:10.31202/ecjse.773088
- [17] M. Nandal, N. Mor, and H. Sood, *An Overview of Use of Artificial Neural Network in Sustainable Transport System*, in V. Singh et al. (Eds.), *Computational Methods and Advances in Intelligent Systems and Computing*, Springer Nature Singapore Pte Ltd., pp. 89-98, 2021. doi: 10.1007/978-981-15-6876-3_7
- [18] W. Jiang, J. Luo, M. He, and W. Gu, "Graph Neural Network for Traffic Forecasting: The Research Progress," *ISPRS International Journal of Geo-Information*, vol. 12, no. 3, p. 100, 2023. <https://doi.org/10.3390/ijgi12030100>
- [19] B. Sun, D. Zhao, X. Shi, and Y. He, "Modeling Global Spatial-Temporal Graph Attention Network for Traffic Prediction," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 56594-56604, 2021. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3049556.
- [20] W. Long, Z. Xiao, D. Wang, H. Jiang, J. Chen, Y. Li, and M. Alazab, "Unified Spatial-Temporal Neighbor Attention Network for Dynamic Traffic Prediction," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 72, no. 2, pp. 1515-1528, 2023. doi: 10.1109/TVT.2022.3157666.
- [21] X. Li, Y. Xu, X. Zhang, W. Shi, Y. Yue, and Q. Li, "Improving short-term bike sharing demand forecast through an irregular convolutional neural network," *Transportation Research Part C*, vol. 147, p. 103984, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2022.103984>
- [22] W. Jiang, "Vehicle destination prediction with spatial clustering and machine learning," *Internet Technology Letters*, e403, 2022. <https://doi.org/10.1002/itl2.403>
- [23] X. Zhu, H. Fang, H. Jiang, J. Bai, V. Havyarimana, and H. Chen, "Understanding Urban Area Attractiveness Based on Private Car Trajectory Data Using a Deep Learning Approach," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 23, no. 8, pp. 12343-12353, 2022. doi: 10.1109/TITS.2022.3121798.
- [24] B. Feng, J. Xu, Y. Zhang, and Y. Lin, "Multi-Step Traffic Speed Prediction Based on Ensemble Learning on an Urban Road Network," *Applied Sciences*, vol. 11, no. 10, p. 4423, May 2021. doi: 10.3390/app11104423.
- [25] X. Zhan, S. Zhang, W. Y. Szeto, and X. Chen, "Multi-Step-Ahead Traffic Speed Forecasting Using Multi-Output Gradient Boosting Regression Tree," *Journal of Intelligent Transportation Systems*, vol. 24, no. 2, pp. 125-141, Feb. 2020. doi: 10.1080/15472450.2019.1582950.
- [26] A. T. Karasahin and A. E. Tumer, "Real time traffic signal timing approach based on artificial neural network," *MANAS Journal of Engineering*, vol. 8, no. 1, pp. 48-54, 2020.
- [27] A. E. Adewale and A. Hadachi, "Neural Networks Model for Travel Time Prediction Based on OD-Travel Time Matrix," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 50819-50829, 2021. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3069372.
- [28] Z. Liu, R. Zhang, C. Wang, Z. Xiao, and H. Jiang, "Spatial-Temporal Conv-Sequence Learning With Accident Encoding for Traffic Flow Prediction," *IEEE Transactions on Network Science and Engineering*, vol. 9, no. 3, pp. 1074-1084, May 2022. doi: 10.1109/TNSE.2022.3087487.
- [29] MATLAB (2022). *Matlab and statistics toolbox release (2022b)*. The MathWorks, Inc., Natick, Massachusetts, USA.
- [30] HCM (2000) "Highway Capacity Manual" Transportation Research Board, National Research Board, 2000, USA.



Ağır Betonlardaki Güncel Gelişmelere Genel Bir Bakış

Current Progresses in Heavy-weights Concrete: An Overview

İlker Bekir Topçu¹, İsmail Hocaoğlu^{2*}, Fatmah Mohammed Adil Adil³¹Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, İnşaat Müh. Bölümü, Eskişehir ilkerbt@ogu.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2075-6361>²Afyon Kocatepe Üniversitesi, Bolvadin Meslek Yüksek Okulu İnşaat Bölümü, Afyonkarahisar ihocaoglu@aku.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9294-1120>³Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, İnşaat Müh. Bölümü, Eskişehir adilfatma47@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6779-9548>

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 7 Nisan 2023
Revizyon xxx
Kabul 16 Mayıs 2023
Online 20 Haziran 2023

Anahtar Kelimeler:

Ultra yüksek performanslı beton,
ağır beton, ağır agregalar,
radyasyon, zırhlama

ÖZ

Beton, bulunduğumuz yüzyılın en yaygın kullanılan yapı malzemesidir. Ağır beton ise özel üretilmiş bir beton çeşididir ve birim hacim ağırlığı yüksek olan betonları tanımlamaktadır. Ağır beton üretimi için ağır agregaların kullanılması gerekmektedir. Teknolojinin ilerlemesi ve artan insan nüfusu ile insanlar, radyoaktif ışın ve dalgalara daha çok maruz kalmaktadır. Üretilecek özel yapı malzemeleri ile bu etkiden kaçınmak mümkündür. Ağır betonlar bu tür ışınlar karşı oluşturdukları zırh etkisi ile canlıları korur. Hali hazırda birçok hastane ve askeri birimlerde kullanılan ağır betonlar üretimi kolay ve kesin çözüm sunan bir yöntemdir. Özellikle nükleer çalışmaların hız kazandığı bu dönemde, ağır betonlar yüksek birim ağırlıkları nedeniyle olası patlama, ışın yayılımı, ayrıca yüksek sıcaklık ve ses etkisinden yüksek korunma sağlar. Bu çalışmanın amacı son yıllarda ağır beton ve ultra yüksek dayanımlı ağır beton ile ilgili yapılan çalışmalarda gelişmeleri takip etmektir. Arama indekslerinde yakın tarihli yapılan literatür araştırması sonucunda ağır betonlar ile ilgili genel bir bakış açısı sunan çalışmaya rastlanmamıştır. Literatürdeki bu eksikğin kapatılması adına bu çalışmanın yapılmasına ihtiyaç duyulmuştur.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 7 April 2023
Received in revised form xxx
Accepted 16 May 2023
Available online 20 June 2023

Keywords:

Ultra-high concrete (HWUHPC),
heavy-weight concrete,
heavyweight aggregates, barite,
radiation, shielding

ABSTRACT

Concrete is the most widely used building material of the current century. Heavy-weights concrete, on the other hand, is a specially produced type of concrete and defines concrete with a high unit volume weight. Heavy-weights aggregates must be used for heavy-weights concrete production. With the advancement of technology and the increasing human population, people are more exposed to radioactive rays and waves. It is possible to avoid this effect with special building materials to be produced. Heavy-weights concretes protect living things with the shield effect they create against such rays. Heavy-weights concrete, which is currently used in many hospitals and military units, is an easy and precise method to produce. Especially in this period when nuclear works accelerate, heavy-weights concretes provide high protection from possible explosion, radiation, and high temperature and sound effects due to their high unit weights. The aim of this study is to follow the developments in the studies on heavy-weights concrete and ultra-high strength heavy-weights concrete in recent years. As a result of the recent literature search in search indexes, no study has been found to provide a general perspective on heavy-weights concretes. This study was needed to close this gap in the literature.

DOI: 10.24012/dumf.1279171

* Sorumlu Yazar:

Giriş

Modern teknoloji çağının en temel unsurları radyasyon ve radyoaktivite olmuştur. Son zamanlarda radyasyonun sağlık alanında, temel bilimlerde, endüstri alanında, askeri amaçlarda ve tarımda kullanılışı ile ileri derecede gelişmeler gözlenmiştir. Radyoaktif ışınlar kanserojen olmakta ve canlı vücuduna zarar vermektedir. Bu nedenle araştırmacılar tarafından radyoaktif yapılarda olabilecek sızıntılara karşı tehlikeli ışınlardan korunmak amacıyla ağır betonlar geliştirilmiştir. Ağır betonlar röntgen odalarında, nükleer reaktörlerde, savunma amaçlı sığınaklarda, su altı petrol gaz ve petrol boru hatlarında, onkoloji hastanelerinde, köprü ayaklarında, beton ağırlıklı barajların gövde kısımlarında, istinat duvarları gibi devrilmeye ve kaymaya karşı güvensiz betonarme yapılarda ağırlık-devrilme ilişkisiyle devrilmeye karşı momenti artırmak amacıyla kullanılmaktadırlar [1].

Ağır beton, birim ağırlığı 2600 kg/m³'ün üzerinde olan ve genellikle özgül ağırlığı 3'den yüksek olan yoğunluklu kaba agrega kullanarak üretilen beton olarak sınıflandırılmaktadır. Ağır agregalarla üretilen betonlar normal agregalar kullanılarak üretilen betonlara göre yaklaşık %50-100 daha yüksek birim ağırlığa sahiptir ve hafif agregalı betonlara göre çok daha maliyetlidir. Ağır beton için kullanılan malzemelerin seçiminde en önemli faktör, yapıdaki bileşenlerin mevcudiyetidir. Ağır betonlarda yaygın olarak barit, manyetit, limonit, siderit, hematit gibi doğal agregalar da kullanılmaktadır. Ayrıca ağır metal oksit, demir, kurşun parçacıkları gibi sanayi atıkları olan yapay agregalarda kullanılabilir [2].

Hibrit bir kurşun-çelik fiber sistem ile ağır betonun birim ağırlığını arttırmaktadır. Çelik lifler, radyasyon kalkanına herhangi bir katkı yapmadan mekanik özellikleri iyileştirirken kurşun lifler ise betonun mekanik özelliklerini iyileştirmeden bir radyasyon kalkanı oluşturmaktadır [3]. Ağır agregalar kullanıldığı takdirde, lineer zayıflatma katsayısı ve yoğunluğu artarken basınç dayanımı ve çekme dayanımı azalmaktadır. Ağır betonun E-modülü normalden daha yüksektir [4]. Portland çimentosunun kısmen değiştirilmesi için demir atık malzemelerinin (nano boyutlu manyetit (Fe₃O₄), yüksek çinko oksit içerikli süper ince çelik tozu ve ferritik duman tozu gibi) kullanımı üzerine çalışmalar yapılmıştır. Ağır betondaki agrega bileşimi, değişkenlik nedeniyle radyasyon kalkanı özelliklerinde önemli bir değere sahiptir [5].

Radyasyondan korunmada kullanılacak betonlarda çimento içeriği, agregalar ve s/ç oranı gibi faktörler önemlidir. Bu nedenle yapılan bir çalışmada, ağır manyetit betonun en büyük agrega boyutu 12,5, 19 ve 25 mm, çimento içeriği (C=350, 400 kg/m³) ve s/ç oranı (s/ç=0,45, 0,65) olarak belirlenmiştir. Ağır manyetit betonun γ (gama) radyasyonuna da karşı koruma özelliklerine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Sonuç olarak agrega boyutu arttıkça ve s/ç oranı azaldıkça radyasyon iletim akısının azaldığı ve ağır manyetit betonun koruma kapasitesinin arttığı görülmektedir. Betonlara yüksek sıcaklık dayanımı

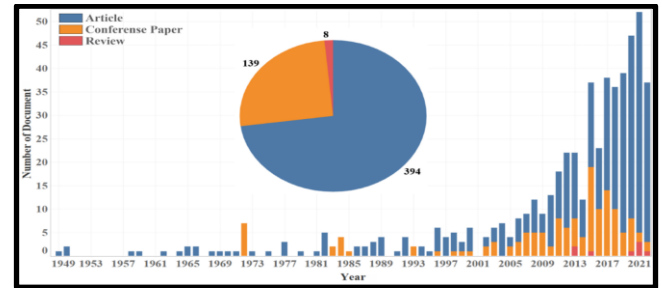
kazandırmak için manyetit ve silis kumu ilave edildiğinde radyasyondan korunma kapasiteleri açısından silis kumuna göre biraz daha iyi olduğu belirlenmiştir [6].

Günümüzde kromit (FeCr₂O₄), volframit [(20Fe, 80Mn) WO₄], hematit (Fe₂O₃), titanyum dioksit (TiO₂), alümina (Al₂O₃), limonit [FeO(OH)·nH₂O] ve barit (BaSO₄) kullanılarak hem yüksek sıcaklık dayanımı hem de iyi radyasyon kalkanı özelliğine sahip yeni tip ağır betonlar üretilmektedir. Hem benzeşim hem de deneysel sonuçlar parafin esaslı ve normal beton ile karşılaştırıldığında yeni ağır betonların, parafin esaslı ve konvansiyonel betona göre yüksek radyasyon zayıflatma kabiliyetine sahip olduğu gözlemlenmiştir [7]. Günümüzde kurşun, γ radyasyon kalkanı için yaygın olarak kullanılmaktadır. Kurşunun toksik etkisi olduğundan sanayide zararlı maddelerin kullanımını kısıtlayan EU RoHS 1 direktifine göre kurşun kullanımını sınırlı olmaktadır. Bu nedenle alternatif malzeme araştırma ve geliştirme çalışmaları devam etmektedir.

Bu çalışmanın amacı son yıllarda ağır beton ve ultra yüksek dayanımlı ağır beton ile ilgili yapılan çalışmalarda gelişmeleri takip etmektir. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde ağır betonlar ile ilgili genel bir bakış açısı sunan çalışmaya rastlanmamıştır. Literatürdeki bu eksiğin kapatılması adına bu çalışmanın yapılmasına ihtiyaç duyulmuştur.

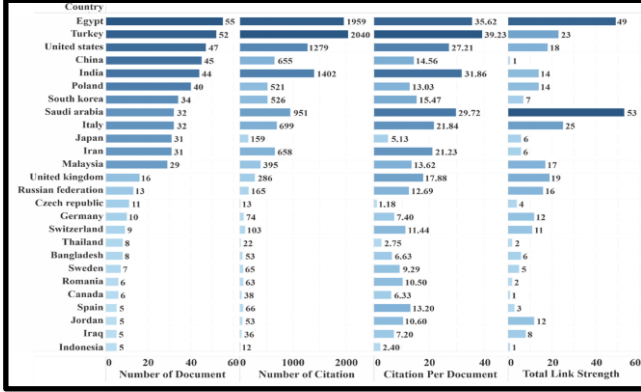
Literatür Araştırması

Günümüzde bilim insanları radyasyonun insan ve çevre sağlığı üzerindeki olumsuz etkilerinin daha çok farkına varmışlardır. Bunun sonucu olarak bilim dünyası beton kompozitlerin radyasyon kalkanı olarak kullanılabilirliğine dair güncel çalışmalara yönelmiştir. Şekil 1, 1949-2022 yılları arasında radyasyon kalkanı olarak beton kompozitlerin kullanımı hakkında yapılan bilimsel çalışma sayılarını göstermektedir. Şekil 1 incelendiğinde 1950'li yıllarda radyasyon zırhı olarak çimentolu sistemlerin kullanımı ile ilgili kısıtlı sayıda araştırma yapıldığı görülmüştür. Ancak son yıllarda özellikle radyasyon probleminin farkındalığının artması ile bilim insanları radyasyona karşı dayanıklı betonların üretilmesine yönelmişlerdir. 2023 yılı hariç 2022 yılına kadar çimento veya beton radyasyon kalkanı konularında toplam 541 araştırmanın yapıldığı gözlenmiştir [8]-[11].



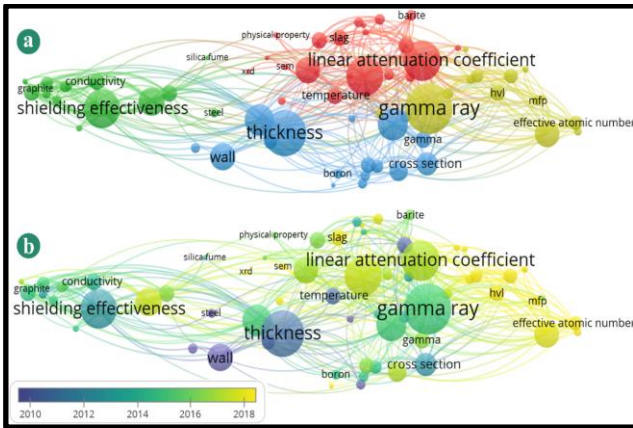
Şekil 1. Scopus tarafından taranan radyasyona dayanıklı betonlar ile ilgili yayınlanan araştırmalar [1].

Ülkemiz radyasyona dirençli beton üretimi üzerine en çok araştırma yapan ülkelerin başında gelmektedir (Şekil 2). Türkiye bilim insanları tarafından bu konuyla ilgili (2022 yılı sonuna kadar) toplam 52 araştırma yapılmış olup, ilgili çalışmalara toplam 2040 atıf yapılmıştır.



Şekil 2. Radyasyon kalkanı olarak beton kompozitlerin kullanımı konusundaki yayınlanan araştırmaların ülkelere göre değişimi [1].

Şekil 3 literatürde yapılan araştırmaların anahtar kelimelerini ve radyasyon kalkanı olarak çimento kompozit malzemelerinin kullanıldığı çalışmalarda anahtar kelimeleri karşılaştırmaktadır. Şekil 3 incelendiğinde en çok araştırma gama ışınları, doğrusal zayıflama katsayısı, kalkan katsayısı ve beton örtü kalınlığı üzerine yapılmıştır.

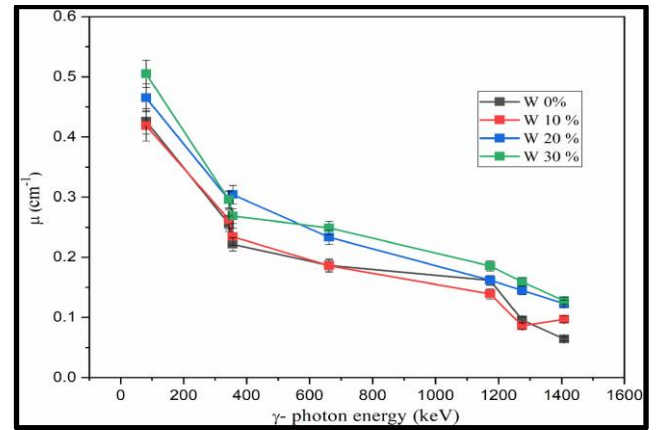


Şekil 3. Anahtar kelime haritası (a) ve radyasyon kalkanı olarak çimento kompozitlerinin kullanıldığı araştırmalarda anahtar kelimelerin (b) üst üste çakıştırılması ile meydana gelen görsel harita [1].

Farokhzad vd. [4], yaptıkları çalışmada Farklı yüzdelerde ferrosfosfor ve normal agregalar, çelik tozu ve nano silika tozu ile yapılan ağır beton numunelerinin basınç dayanımını incelemişlerdir. Belirtilen malzemelerin farklı yüzdelere sahip 60 adet 15 cm'lik küp beton numunesi üretilmiş ve

basınç dayanımları 28 günde aynı yükleme hızında ölçülmüştür. Basınç dayanımı belirlendikten sonra, numunelerin lineer zayıflama katsayısı sezyum-137 kaynağından γ ışını ve radyasyon ile belirlenmiştir. Sonuçlar, basınç dayanımını arttırmada en etkili faktörlerin sırasıyla ferrosfosfor agregaları, nano silika tozu ve çelik tozu olduğunu göstermektedir. Doğrusal zayıflama katsayısını arttırmada en etkili faktörler sırasıyla ferrosfosfor agregası, çelik tozu ve nano silika tozudur. En yüksek basınç dayanımları, 28 günde %100 ferrosfosfor, %20 çelik tozu ve %5 nano silika ile yapılan ve yaklaşık 52 MPa basınç dayanımı elde edilen numunelerde gözlemlenmiştir. En düşük basınç dayanımı, %25 ferrosfosfor, %10 çelik tozu ve nano silika olmadan elde edilen 25 MPa dayanıma sahip olan numunede elde edilmiştir. Ayrıca numunelerin lineer zayıflama katsayısı deneyi sonuçlarına göre, en yüksek lineer zayıflama katsayısı % 100 ferrosfosfor, % 30 çelik tozu ve % 5 nano silika ile yapılan numunelere ait olup, en düşük lineer zayıflama katsayısı 0,295 olup, % 8 nano silika ile ferrosfosfor ve çelik tozu kullanılmadan yapılan numune ise bu değer 0.1514'dir.

Mahmoud vd. [12], γ -ışını yayan fotonlar için birçok radyoaktif izotop (Ba-133, Na-22, Eu-152, Cs-137 ve Co-60) kullanarak 81 keV'den 1408 keV'ye genişletilmiş enerjinin beton üzerindeki etkilerini araştırmışlar, 662 keV'lik γ -foton enerjisinde metalik atık içeriğinin ağırlıkça %0 ila %30 arasında yükselmesi ile zayıflama katsayısı (μ) değerinin yaklaşık olarak %33 oranında bir artış gösterebileceğini gözlemlenmişlerdir (Şekil 4) [12].



Şekil 4. Betonlarda metal atık oranı ile zayıflama katsayısı arasındaki ilişki [12].

Azeez vd. [5], yaptıkları çalışmada çelik çürüf, çelik bilye ve demir cevheri içeren farklı yüksek yoğunluklu iri agregalar kullanılarak hazırlanan ağır beton karışımlarının radyasyondan korunma performansını incelemişlerdir. Normal ağırlıklı kireçtaşı agregası, bazı ağır beton karışımlarında yüksek yoğunluklu agregaların kısmen değiştirilmesinin yanı sıra kontrol karışımında da kullanılmıştır. Normal ve yüksek yoğunluklu iri agregaların

farklı kombinasyonları göz önünde bulundurularak ve çimento içeriği ve s/ç oranı sabit tutularak toplam 19 ağır beton karışımı hazırlanmış ve bunların kuru yoğunluğu, basınç dayanımı ve nükleer radyasyon tepkisi incelenmiştir. Normal ağırlıkta kireçtaşı agregası içeren kontrol karışımı dışında, 18 ağır beton karışımının tamamında kabul edilebilir (2600-3563 kg/m³ aralığında) kuru birim ağırlığa ulaşılmış, 26-45 MPa aralığında değişen karışımların basınç dayanımının, tümünün yapısal bir betonun gereksinimlerini karşıladığı görülmüştür. Radyasyon önleme performansı, iri agrega tipine ve beton karışımının dayanım sınıfına bakılmaksızın beton karışımlarının birim ağırlığından etkilenmektedir. Deneysel verilere dayalı olarak, radyasyon kalkanı performansının göstergesi ile betonun birim ağırlığı arasındaki korelasyonlar ile yüksek derecede uyum elde edildiği bildirilmiştir. Gasthi vd. [13], yüksek fırın cürufu ve normal betonların gama ve nötron radyasyonları uygulandığında etkilerini araştırmışlardır. Mineral katkılı betonlarda nötron ve gama ışınlarına karşı daha yüksek radyasyon direnci gözlemiştirler [13].

Mehrnejad [14], çalışmasında radyasyondan kaynaklanan çeşitli zararlı etkilerden korunmak için betonun zırhlanmasında kullanılacak en uygun malzemeleri belirlemiştir. Betonun x ve γ ışınları geçirmemesi için barit agregası (yüksek yoğunlukta), nötron parçacıklarının olumsuz etkilerini azaltmak için ise bor, bor-karbit ve galena malzemeleri kullanılmıştır.

Bakırhan [15], çalışmasında maden ocaklarından çıkan kurşun madeni atıklarından oluşan agregalar ile üretilen ağır betonların radyasyon zırhlama özelliğini incelemiştir. Beton karışımında kurşun madeni atıkları, manyetit, barit gibi agregalar %25 ve %75 değerler aralığında kullanılarak C16/20, C25/30 ve C35/45 sınıfı betonlar üretilmiştir. Araştırmada radyasyon enerjisi artmasına karşılık olarak kütle azaltma katsayısında düşüş olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca manyetit-pasa agregası karışımı ile hazırlanan farklı dayanımlı betonlar üzerinde 4 farklı enerji seviyesinde radyasyon soğurma katsayıları incelenmiş ve tüm enerji seviyeleri için karışımda sadece manyetit agregasının kullanıldığı ve en yüksek radyasyon soğurma katsayısı C35/45 sınıfındaki betonda elde edilmiştir.

Demirci [16], çalışmasında s/ç oranının 0.4, 0.5 ve 0.6 olduğu, pirit, krom, manyetit ve normal agregayla üretilen ağır betonlar üzerinde araştırma yapmış, s/ç oranının arttığında; basınç dayanımı, E-modülü ve artan enerji ile soğurma katsayılarını azalttığı sonucunu elde etmiştir. Ayrıca manyetit agregalı betonların radyasyonu en iyi soğuran beton olduğunu bildirmiştir. Kharita, vd. [17], yaptığı çalışmada karbon tozu ilavesinin hematit radyasyon kalkanlı betonunun özellikleri üzerindeki etkisini incelemiştir. Koruyucu özellikler üzerindeki etkilerini araştırmak için hematit agregaları ile hazırlanan betona farklı yüzdelere karbon tozu ilave edilmiş, hazırlanan betonların mekanik ve radyasyon zayıflama özellikleri belirlenmiştir. Betona %6 (ağırlıkça) karbon tozu ilavesinin beton üzerindeki dayanımı yaklaşık %15 artırabileceği

bulunmuştur. Artan karbon tozu içeriği ile hem γ hem de nötronlar için koruma etkinliği azalmıştır. Ancak hem γ ışınları hem de nötronlar için koruma etkinliğindeki bu kayıp, %6'lık karbon tozu ilavesi için ölçüm hataları aralığında olmaktadır. Deneysel ölçümler için simülasyonlar, karbon tozunun nötronlara karşı koruma etkinliği üzerindeki etkilerini araştırmak için Monte Carlo (MCNP) kodu kullanılmıştır. Simülasyon ve deneysel sonuçlar arasında iyi bir uyum yakalandığı bildirilmiştir.

Nikbin, vd. [18] çimento esaslı kompozit malzemelerde çimento yerine %8 oranında nano-TiO₂ konulması ile gama radyasyonu ışınlarının önemli ölçüde engellenebileceği sonucuna ulaşmışlardır [18].

Rezaei Ochbelagh, vd. [19], yaptığı çalışmada 59,5 ve 661 keV foton enerjilerinde toplam kütle zayıflama ve doğrusal zayıflama katsayıları, yarı değer kalınlıkları, etkin atomik sayıları, etkin elektron yoğunlukları ve atom kesitlerini ölçülmüştür. Ölçülen ve hesaplanan değerler karşılaştırılmıştır. Kaydedilen değerlerin enerji ve beton bileşimi ile bir değişim gösterdiği de bildirilmiştir. Ayrıca; kurşunun mekanik özellikleri ve radyasyona etkisi betonun korunması da incelenmiştir. γ ışını radyasyonunun beton basınç dayanımı üzerindeki etkisini incelemek için çeşitli numuneler hazırlanmıştır. Geliştirilen betonun yoğun yapısı SEM mikroskobu ile doğrulanmıştır. Farklı kurşun yüzdeleri ile karıştırılan konik giritin γ ışını koruması da incelenmiş, %90 kurşun tozu ve %10 çimento içeren betonun en yüksek dayanım ve γ ışını koruyucu özelliklerine sahip olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

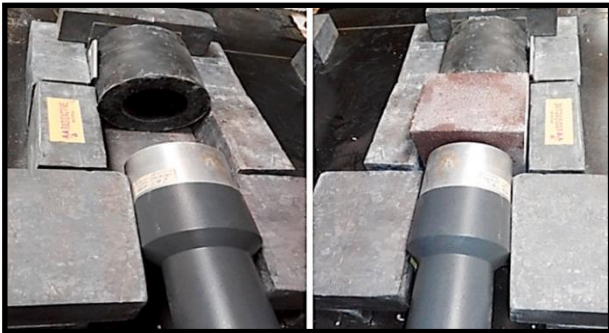
Akkurt, vd. [20], çalışmasında farklı karışımlarda (%0, %10, %30 ve %50) agrega olarak zeolit içeren beton için doğrusal zayıflama katsayısı ölçülmüştür. Dört beton blok üzerinde ölçülen doğrusal zayıflama katsayısı, zeolit miktarının artmasıyla azalmıştır. Betonda agrega olarak zeolit ilavesinin radyasyondan korunma amacıyla kullanılacak alternatif bir seçenek olmadığı görülmüştür.

Korkut, vd. [21], yaptıkları çalışmada kolemanit, üleksit ve tinkal cevherlerinin nötron koruyucu özelliğini incelemiştirler. Numuneler mikroskobik kesitlerle incelenmiş ve ayrıca toplam makroskobik kesitleri simüle etmek için FLUKA Monte Carlo kodu kullanılmıştır. Artan bor atomu konsantrasyonlarının seçilen cevherlerin nötron koruyucu özelliğini güçlendirebileceği bildirilmiştir. Revuelta, vd. [22], yaptıkları çalışmada ağır betonun üretiminde ayrışmayı incelemiştir. Farklı oranlarda akışkanlaştırıcı ve barit agregası kullanarak ağır beton üretmişlerdir. Yaptıkları araştırmada %1,8 kimyasal katkı konularak kendiliğinden yerleşen beton özelliği gösteren ağır beton üretmişlerdir. Sadece taze betonda kusmalar gözlemlenmiştir. Yine ağır beton üretiminde ayrışma oluşmaması için ince taneli malzeme miktarının 160-240 lt/m³ olması gerektiği sonucuna da ulaşmıştır. Çakı [23], çalışmasında ağır betonların E-modülünü incelemiştir. Barit agregası kullanılarak, en büyük dane çapı 16 mm olan farklı s/ç (0.63, 0.54 ve 0.46) oranlarına sahip 3 farklı ağır beton üretmiş, üretilen ağır betonların basınç dayanımlarının

sırasıyla 46.69 MPa, 63.69 MPa ve 62.24 MPa olduğu gözlenmiştir [23]. Üretilmiş ağır betonların E-modüllerinin ACI, TS 500 ve CEB’de tanımlanan E-modülü değerlerine oldukça yakın olduğu, bu nedenle barit agregalı beton tasarımında ACI 318-95, TS 500 ve CEB’deki E-modülü formülüyle hesaplanabileceği gözlenmiştir.

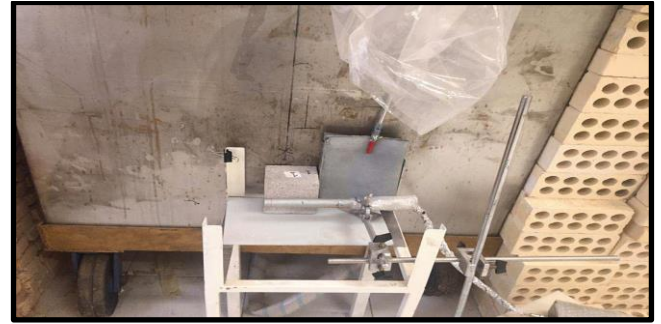
Güreş [24], çalışmasında, Kahramanmaraş Şekeroba yöresinde bulunan barit agregasının ağır beton üzerindeki etkisini araştırmıştır. Ağır beton üretiminde kullanılacak olan Şekeroba barit agregalarının yoğunluğu 4.0 kg/m^3 ’ün üzerinde olup su emme değerleri sırasıyla %0.4 ve %0.3 olarak belirlenmiştir. Bu özelliklere sahip barit agregalarının ağır beton üretiminde kullanılmasında uygun olduğu sonucuna varılmıştır. Karışımda kullanılan agregaların aşınmaya karşı direncinin düşük olması nedeniyle betonun kalıplara düzgün yerleştirilmesine dikkat edilmesi gerektiğini, ayrıca taze betonun işlenebilirliğinde olumsuz bir etkinin olmaması için karışım tasarım ve üretimde önlemler alınması gerektiği ifade edilmiştir. Khan, vd. [25], yaptıkları çalışmada kumun kısmen ultra ince parçacıkları olan ve kumdan yaklaşık iki kat daha ağır olan hematit tozuyla değiştirilmesiyle beş ağır ultra yüksek performanslı beton karışımını değerlendirmiştir. Bu karışımların kuru yoğunluğu, yaklaşık 2600 kg/m^3 ila 2900 kg/m^3 arasında değişmiştir ve bunların tümü, ağır ağırlık kategorisi altında değerlendirilmek için en düşük kuru yoğunluk gerekliliğini karşılamaktadır.

Ultra yüksek dayanımlı ağır beton karışımları farklı kuru yoğunluklara sahip olmalarına rağmen, mekanik özellikleri önemli ölçüde değişmemiş ve kum ikamesinin olumsuz bir etkisi görülmemiştir. Radyasyon kalkanı, karışımların kuru yoğunluğundaki artışla birlikte artmıştır. Bununla birlikte, ultra yüksek dayanımlı ağır betonun γ radyasyon kalkanı, aynı kuru yoğunluğa sahip olan geleneksel ağır betonuna göre daha yüksek olduğu bulunmuştur. Bu da mikro yapı yoğunluğunun, beton yoğunluğunun yanı sıra radyasyon kalkanlamasını da geliştirdiğini göstermektedir. γ radyasyon kalkanı deney düzeneğinin numune içeren ve içermeyen durumu Şekil 5’de gösterilmiştir.



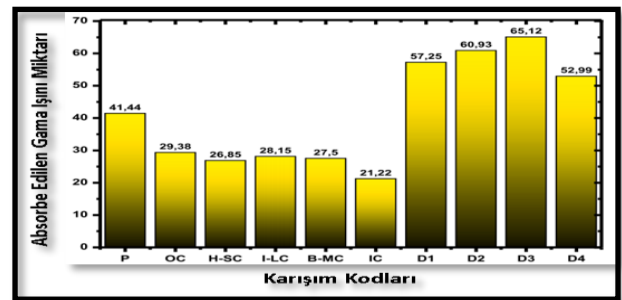
Şekil 5. γ radyasyon kalkanı deneyi, numune konmamış (sol) ve numune konulmuş hali (sağ) [25].

Son yıllarda ağır beton mekanik özelliklerini iyileştirmek, radyasyon koruması sağlamak, iyi işlenebilirlik, yüksek dayanım ve dayanıklılık, yüksek çatlama direnci, düşük geçirgenlik ve düşük büzülme için çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Bu belirtilen özelliklerin geliştirilmesi adına El-Sayed [26], yaptığı çalışmada %15 pirinç kabuğu külü, %3 polietilen, %0.3 borik asit, %3 nano silika ve yüksek oranda su azaltıcı yerine, manyetit kaba ve ince agregası kullanılarak altı karışım hazırlanmıştır. Tüm karışımlar 0.4’lük bir s/ç oranı ve 440 kg/m^3 çimento dozajı kullanarak ultra yüksek dayanımlı ağır betonun taze haldeki ve sertleşmiş haldeki mekanik özellikleri incelenmiştir. Deneysel sonuç olarak, %3 polietilen ile manyetit agrega karışımının mekanik özellikleri benzer beton karışımlarına göre iyileştirdiği ancak %15 pirinç kabuğu külü içeren manyetit basınç dayanımının, çimento ikame malzemeleri olarak kullanılan %3 polietilen ile manyetitten daha yüksek olduğunu göstermiştir. Bu nedenle, %3 polietilen içeren manyetit, radyasyondan koruma için ağır betonun mekanik özelliklerini geliştirdiği anlaşılmıştır. Bu çalışmada, genel olarak, %3 polietilenli manyetit nötron radyasyon kalkanı (Şekil 6) için optimum beton karışımı olduğu bulunmuştur.



Şekil 6. Betonlardaki nötron radyasyon deneyi [13].

Aygün, vd. [27] yaptıkları çalışmada, farklı tipte mineraller (krom cevheri, hematit (Fe_2O_3), titanyum oksit (TiO_2), limonit [$\text{FeO}(\text{OH})\text{nH}_2\text{O}$] ve siderit (FeCO_3), krom oksit (Cr_2O_3) ve mangan oksit (MnO_2)) nötron ve γ kalkanlama etkinliği açısından incelemiş, geliştirilen betonların mekanik deneylerinde 30 MPa’ya kadar dayanıma sahip olduğu gözlemlenmiştir. Sıcaklık ve dayanım deneylerinde sonuçların istenilen seviyeye kadar çıktığı bildirilmiştir (Şekil 7).



Şekil 7. Karışımların emdiği γ ışını miktarları [27].

Elde edilen sonuçlar parafin esaslı beton, sıradan betonlar ve bazı ağır betonlar ile karşılaştırılmıştır. Hem teorik hem de deneysel hesaplamalar, tüm yeni ağır betonların, referans numunelerden daha yüksek oranlarda γ ve nötron radyasyonu emdiğini göstermektedir. Özellikle, D3 numunesi, %55 krom cevheri içeren maksimum nötron zayıflatma doz değerine sahiptir. D2 ise üstün γ koruyucu betondur ve bu karışım %60 krom cevheri, %10 hematit ve %5 TiO_2 içermektedir. Bu çalışma ile yeni geliştirilen ultra yüksek dayanımlı ağır betonların, nükleer enerji uygulamaları için alternatif koruyucu malzemeler olabileceği tespit edilmiştir.

Ultra Yüksek Performanslı Beton

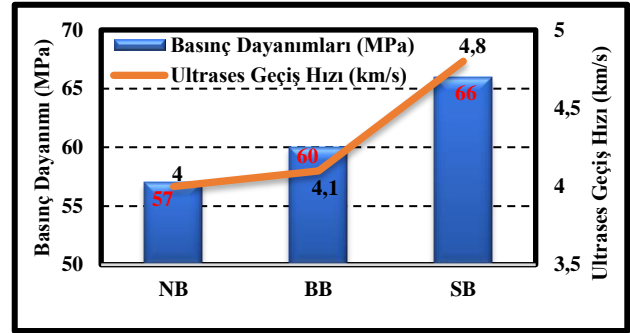
Son zamanlarda, ultra yüksek performanslı beton (UHPC), özel bileşimi nedeniyle çok yüksek dayanıma (150 MPa'nın üzerindeki basınç dayanımı), yüksek E-modülüne, kırılma tokluğuna ve mükemmel dayanıklılık özelliklerine sahip yeni bir yapı malzemesi olarak ortaya çıkmaktadır. UHPC'nin mekanik özellikleri ve dayanıklılık açısından sağlamlığının anahtarı, çok miktarda çimento ve ultra ince mineral dolgu, çok ince kuvars kumu, çelik lifler kullanılarak elde edilen yüksek yoğunluklu mikro yapısıdır. Düşük su/bağlayıcı oranı ve matrsten kaba agregaların çıkarılması UHPC'nin yüksek performanslı betondan (HPC) çok daha üstün mekanik ve dayanıklılık özelliklerine sahip olduğu rapor edilmiştir. HPC ile karşılaştırıldığında, UHPC'nin basınç dayanımı 2-3 kat daha yüksek, eğilme dayanımı 2-6 kat daha yüksek, E-modülü 1.5 kat daha yüksek, permabilitesi 50 kat daha düşük, klorür iyonu difüzyonu 25 kat daha düşük ve korozyon oranı 8 kat daha düşüktür. UHPC, mükemmel mekanik özelliklere ve dayanıklılık performansına sahip akıllı bir yapı malzemesi olarak nükleer santrallerde yapı elemanlarının yapımında kullanılmaktadır. Bununla birlikte, UHPC nükleer radyasyonlara maruz kalmaya karşı hassastır. Bir malzemenin nükleer radyasyona karşı korunmasını etkileyen ana faktör, daha önce açıklandığı gibi yoğunluğu olduğundan, bir nükleer santralde kullanılabilecek UHPC karışımının HWC kriterlerini karşılaması gerekmektedir. Kapsamlı bir literatür araştırması, UHPC'nin radyasyon zırhlamadaki etkinliğinin yanı sıra mekanik özellikler ve dayanıklılık özellikleri açısından performansı hakkında çok az sayıda çalışmanın rapor edildiğini göstermektedir [3].

Gökçe [28], yaptığı çalışmada ağır, yüksek performanslı fiber takviyeli çimento esaslı kompozit (HPFRCC) karışımları geliştirmiştir. HPFRCC karışımları, bir durumda ince agrega olarak barit kullanılarak ve başka bir durumda ince agrega olarak granüle demirli atık kullanılarak ayrı ayrı hazırlanmıştır. HPFRCC karışımlarının mekanik özellikleri, ince bir agrega olarak silika kumu-kuvars tozu karışımından oluşan referans UHPC karışımınıninkine karşılaştırılmıştır. Granüle demirli atık agrega içeren HPFRCC karışımın, reolojik ve mekanik özellikler açısından gelişme göstermekte olduğu bildirilmiştir. Ancak HPFRCC karışımında ince agrega olarak barit kullanılması mekanik özellikleri

azaltmaktadır. Çalışmada sonuç olarak tüm HPFRCC karışımları için radyasyon korumasına yönelik performansta önemli bir artış olduğu belirlenmiştir.

Ağır Betonların Özellikleri ve Kullanım Alanları

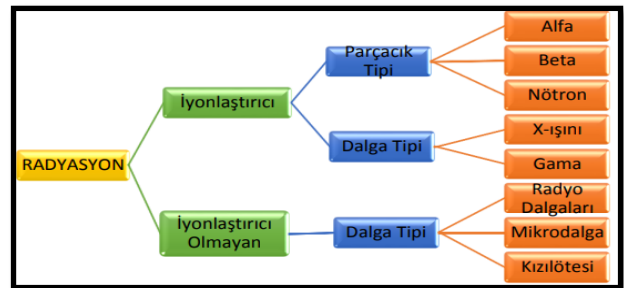
Bu başlık altında ağır betonların son yıllarda keşfedilen, araştırılan ve literatüre kazandırılan bazı özelliklerinden bahsedilecektir. Yapısal anlamda birçok farklı işlevi olan ağır betonların, bilinmeyen özellikleri ve genişleyen kullanım alanları bu kısımda incelenecektir. Gümü, vd. [29] çalışmalarında ağır betonların gözenek boşluklarını incelemede ultrases geçiş hızı deneyi uygulamıştır. Bu kapsamda, normal beton (NB), barit içeren ağır beton (BB), siderit içeren ağır beton (SB) üretilerek basınç dayanımları ve ultrases geçiş hızı değerleri Şekil 8'de verilmiştir. Şekil incelendiğinde basınç dayanımı arttıkça ultrases geçiş hızının arttığı gözlemlenmiştir. Dolayısı ile ağır agregalı betonların basınç dayanımı yüksek, boşluk oranı ise düşük olmaktadır.



Şekil 8. Basınç dayanımları ve ultrases geçiş hızı [29].

Radyasyon

Radyasyon en genel anlamıyla, maddenin elektromanyetik dalgalar şeklinde yayılmasıdır. Madde ile etkileşimlerine göre radyasyon çeşitleri Şekil 9'da gösterilmiştir [30]. Parçacık tipi radyasyonu Alfa (α), Beta (β) ve nötron kozmik ışınlarından oluşmaktadır. Dalga tipi radyasyon ise titreşim yoluyla ilerleyen kütesiz enerjilerin yayılmasıdır. İyonlaştırıcı ve iyonlaştırıcı olmayan dalga tipi radyasyonlar ışık hızıyla eşdeğer hızda yayılmaktadır [31].



Şekil 9. Madde ile etkileşimine göre radyasyonlar [30].

Burada hedeflenen radyasyonla insanlar üzerinde oluşabilecek zararlı etkileri azaltmaktır. Zararlı etkileri azaltmak için radyasyona neden olan kaynak ile insan arasına radyasyon emici yerleştirilerekdir. Zararlı ışınlarının diğer cisimlere çarpması sonucu ortaya çıkan nötron ışınları ise küçük atom ağırlıklı elementler ile olumsuz etkileri azaltılmaktadır [32].

Zırhlamadaki Zararlı Işınlara

Radyoaktif ortamlarda zırhla korunması gereken zararlı ışınların özellikleri aşağıda açıklanmaktadır:

Alfa (α) Parçacıkları

α parçacığı, nötron-proton oranı çok düşük olduğu durumda yüksek enerjiye sahip helyum çekirdekleridir. Çoğunlukla atom numarasının yüksek olduğu izotroplarda gözlenen bu olay çekirdekten α parçacıklarının kopmasıyla oluşur. Günümüz teknolojisinde α parçacıklarının çok ince tabakalı maddeler ile durdurulabilmektedir. α parçacıklarının enerjilerini kolay kaybetmeleri nedeniyle dış radyasyon tehlikeleri bulunmamakta olup 10 cm'lik bir hava tabakası yeterli zırh olarak kabul edilmektedir [29].

Beta (β) Parçacıkları

β parçacıkları α parçacıkları gibi geçtikleri maddeler içerisinde iyonlaşmaya neden olmaktadır. β parçacıkları α parçacıklarından daha hafiftirler. Bu nedenle iyonlaşma kapasiteleri de α parçacıklarına göre daha düşüktür. β parçacıklarının bir diğer özelliği ise bir madde içerisine oldukça yüksek oranda nüfuz edebilme kapasitesine sahip olabilmeleridir. Günümüzde β parçacıklarının olumsuz etkilerinden korunmak için alüminyum levhalar kullanılmaktadır [29].

Nötronlar

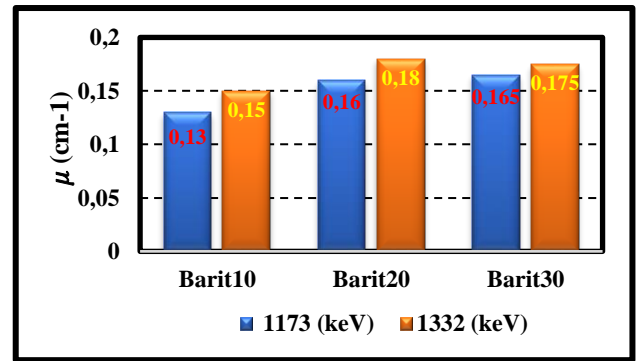
Yüksüz durumdaki nötron parçacıkları maddeler içerisine yüksek oranda nüfuz edebilmektedirler. Nötronlar doğrudan iyonlaşma özelliğine sahip olmasalar da atomlar ile etkileştiklerinde β , α , γ ve x ışınları gözlemlenmektedir. Nötronları parafin, su ve beton kütleleri ile durdurulabilmektedir [29].

Gama (γ) ve Röntgen (x) Işınlara

Elektromanyetik ışınlar olan γ ve x ışınlarının dalga boyları (0.1-100 Å) arasında oldukça düşük seviyededir. x-ışınlarının frekansı görünür ışığın frekansından 1000 kat daha büyüktür. x-ışınları dalga ve tanecik özellikleri göstermeleri nedeniyle çift karakterlidirler. Tanecik özellik gösteren radyasyona foton denilmektedir. Gama ışınları ise

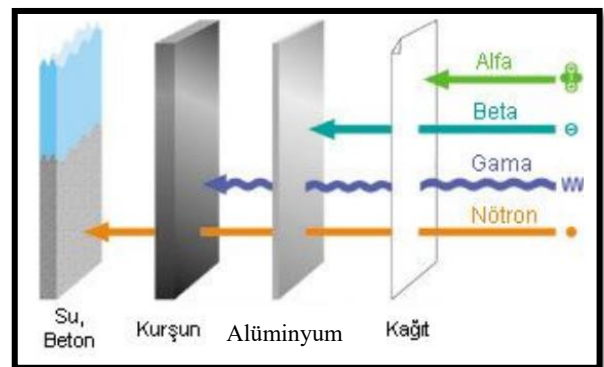
radyoaktif izotropların ayrışmasıyla ortaya çıkmaktadır. Zırlamanın amacı γ ve x ışınları ile nötronlara karşı korumadır.

Kullanılacak zırhın seçimi ve zırh kalınlığı; malzemenin radyasyon zayıflatma katsayısı ve malzemenin kimyasal bileşimine, radyasyon türü ve enerjisine bağlı olmaktadır [33]. Radyasyon zırlamasında ağır agrega kullanımının radyasyon zırlamaya etkileri incelenmiş, ağır agrega olarak farklı oranlardaki katsayıları Şekil 10'da yer almaktadır ve beton içerisinde bulunan barit arttıkça betonun radyasyon soğurma özelliği de artmaktadır [23],[33].



Şekil 10. Zayıflatma katsayılarının enerji grafiği [33].

Şekil 11'de α , β , γ ve nötron gibi radyoaktif ışınların geçebildiği ve etki edebildiği elementler gösterilmektedir. Alfa ışınları insan teninden geçemezken beta ışınları insan tenini geçerek alüminyumda soğurulmaktadır. γ ışınları ise alüminyumu geçerken kurşun elementini geçememektedir. Nötronlar ise bütün bu elementlerden geçerken ağır agrega içeren ağır betondan geçememektedir [34].



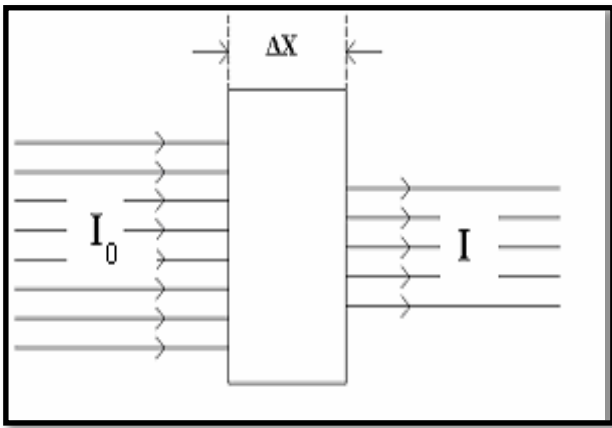
Şekil 11. α , β , nötron, γ ve x ışınının etkileri [34].

x ve γ ışınları madde ile etkileşimi üç farklı yolla gerçekleşmektedir. Bunlar; foto elektrik olayı, Compton olayı ve çift oluşum olaylarıdır. Bu olayların oluşma olasılıkları, x ve γ ışınları ile etkileşen maddenin atom

numarasına göre değişkenlik göstermektedir [35]. Radyasyon şiddetinde azalma olmasına radyasyonun zayıflaması, x ve γ ışınları ile etkileşen maddeden uzaklaştırılan enerjiye ise soğrulma denilmektedir.

Lineer ve Kütle Zayıflatma Katsayıları

x ve γ ışınları malzeme üzerinden geçtiği esnada fotoelektrik olayı, Compton saçılması, ışın demetlerinin şiddetlerinde azalma meydana gelmesidir. İlk aşamada I_0 şiddetindeki bir foton, Δx kalınlığındaki bir malzemenin içinden geçtiği esnada şiddeti I kadar azalmaktadır. Işın şiddetindeki bu azalma, doğrudan malzemenin kalınlığı ile ilişkilidir (Şekil 12) ve denklem (1) ile bulunmaktadır [34].



Şekil 12. x ve γ ışını soğurmaları [20].

$$dI/\Delta x = -\mu dx \quad (1)$$

Denklem 1'de x 'e göre (kalınlığına) integrali alındığında, bir ışın demetinin soğurucudan geçtiği sıradaki foton şiddetinin değişimi Denklem 2 yardımıyla hesaplanabilir [34].

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (2)$$

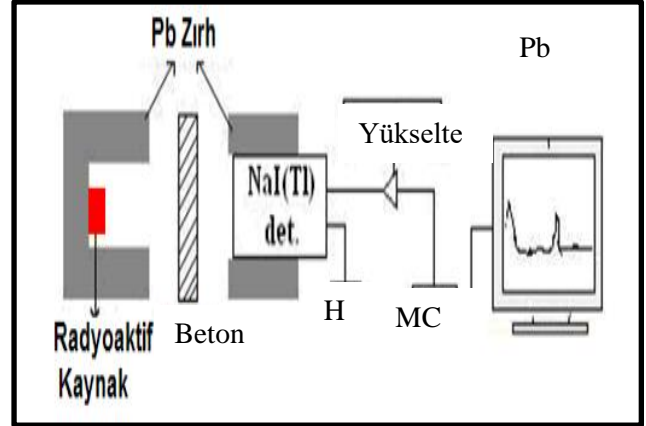
Denklemden μ katsayısı (birimi cm^{-1}) soğurma katsayısıdır [36],[37]. Lineer zayıflatma katsayısı (LZK) soğurulan şartlarda birim uzunluğun etkileşmesi olasılığıdır. Compton, Fotoelektrik ve çift oluşum etkileşimleri σ , τ ve κ sembolleriyle gösterilirler. Kısmi zayıflama katsayısı ve toplam zayıflama katsayısı σ , τ ve κ etkileşmesi sonucu meydana gelen zayıflatma katsayısı toplamıdır (Denklem 3) [38],[39].

$$\mu = \tau + \sigma + \kappa \quad (3)$$

Fotonun ne kadar soğurulduğunun belirlenmesinde kullanılan bu bağıntı, bir foton ışın demetinin tamamen soğurulmasının mümkün olmadığını belirlemiştir. Ancak uygulamada soğurma çok yüksek oranda (algılanılamayan düzeyde) olabilmektedir. Bu oran kütle zayıflama katsayısı (KZK) μ_m ile gösterilmektedir. KZK, denklem (4) ile hesaplanmaktadır [34].

$$\mu_m = \mu/\rho \quad (4)$$

Şekil 13, kullanılan fotoçoğaltıcı tüp (içinde bir fotokatod ile kademeli olarak artan voltaj olan bir dizi elektrot bulunan havası boşaltılmış cam bir tüp), yükselteç, çok kanallı analizörden ve önyükselteçten oluşan sistemin şematik olarak gösterilmektedir. Ölçüm öncesinde γ spektrometre cihazının kalibrasyonunun yapılması gerekmektedir.



Şekil 13. Fotoçoğaltıcı tüp ve yükselteç [40].

Elde edilen ölçümler neticesinde KZK Beer-Lambert eşitliği yardımıyla hesaplanabilmektedir.

$$\mu = \frac{1}{x} \ln \frac{I_0}{I} \quad (5)$$

Burada x mineral katkı (YFC) betonun kalınlığını, I_0 detektör ve kaynak arasındaki pik alanını (beton bulunmadığı durumda) ve I detektör ve kaynak arasında beton bulunduğu durumdaki pik alanı temsil etmektedir [40].

Zararlı Işınlara Kalkan Kullanımı

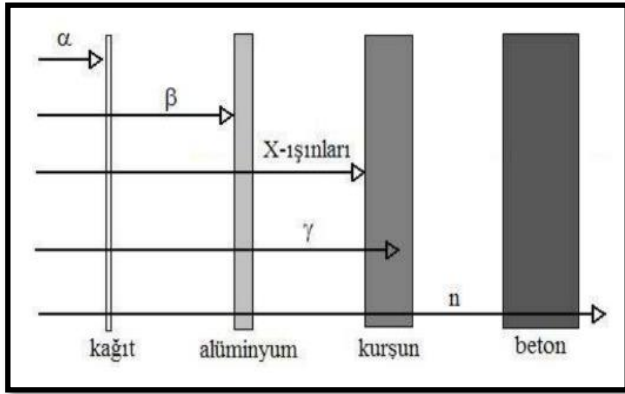
Yarı değer kalınlık (YDK) bir malzemenin üzerine gelen ışın demetlerinin yarısının kalınlığıdır. Malzeme üzerinden geçen ışın demetlerini %90 oranında düşüren kalınlık ise 10^2 'de bir değer kalınlığıdır (ODK). Malzemelerin yarı değer kalınlıkları ve onda bir değer kalınlıkları Denklem 6 ve Denklem 7 yardımlarıyla hesaplanabilir ve bu denklemler yüksek zırhlama yapmak için kritik öneme sahiptirler [34]. Bu denklemler γ ışınlarının zırhlamasında da etkilidir [34]. Bir malzeme içerisinden geçen radyasyon malzemenin atom numarası, öz kütlesi ve foton enerjileri ile yakından ilişkilidir. YDK bir radyasyon çeşidinin malzeme içerisine ne derecede nüfuz ettiğini belirlemek için en sık tercih edilen yöntemdir. Şöyle ki YDK ve ODK değerleri doğru belirlendiğinde radyasyonun malzemenin diğer kalınlıklarındaki nüfuz etme oranları da belirlenebilmektedir [34]. Radyasyonun bir diğer şekli de herhangi bir elektrik yükü taşımayan nötronlardır. Nötronlar, yalnızca atom çekirdekleri ile çarpışmaları sonucu yavaşlarlar. Malzemelerde nötron zırhlaması yapmak için üç sınıf malzemenin birleştirilmesi gerekmektedir. Oluşturulması gereken zırh atom numarası yüksek elementlerden meydana

gelmelidir. Böylece hızlı hareket eden nötronlar çarpışma sonucu yavaşlatılabilmektedir [29].

$$YDK=ln2/\mu \quad (6)$$

$$ODK=ln10/\mu \quad (7)$$

Radyasyona karşı malzeme giriciliklerinin karşılaştırılması Şekil 14'de gösterilmiştir.



Şekil 14. Radyasyona karşı malzeme giriciliklerinin karşılaştırılması [35],[41].

Ağır Betonda E-Modülü

Yapısal beton çok bileşenli (kompozit) bir malzeme olduğundan dolayı betonun E-modülünü, yoğunluğunu ve hacmini bileşimine giren malzemelerin özellikleri belirlemektedir. E-modülüne etkileyen bütün faktörler aslında betonun basınç dayanımını etkileyen faktörlerin kendisi olmaktadır. Ağır beton tasarımı yapılırken kullanılan yüksek E-modüllü iri agregalar, betonun E-modülünü de arttırmaktadır. Ayrıca E-modülüne etkileyen diğer unsurlar; çimento hamurunun boşluklu yapısı, agregaların D_{maks} değeri, agregaların dağılımı ve yüzey şekli olmaktadır.

Ağır Beton Agregaları

Başlıca beton bileşenleri çimento, agrega ve su'dur [42]. Beton üretiminde maliyeti düşürmek ve dayanımı arttırmak için yaklaşık %60-80 oranında agrega (kıyma kum, kıymataş, çakıl vb.) kullanılmaktadır. Ağır beton üretmek için kullanılması gereken agreganın özgül ağırlıkları 4.0 gr/cm^3 'ün üzerinde olmalıdır. Ağır beton üretiminde kullanılan başlıca agregalar limonit ($2\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), barit (BaSO_4), hematit (Fe_2O_3), manyetit (Fe_3O_4), viterit (BaCO_3), ilmenit (FeTiO_2), geotit ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) vb. doğal agregalardır. Yapay agrega olarak ise kurşun parçacıkları, demir saçmaları, ferrosfosfor ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{P}_2\text{O}_5$) ve ferrosilikon kullanılabilmektedir. Ağır beton üretiminde genellikle birim ağırlığını 3600 kg/m^3 'e kadar çıkarabilen barit (baryum sülfat) kullanılmaktadır [34].

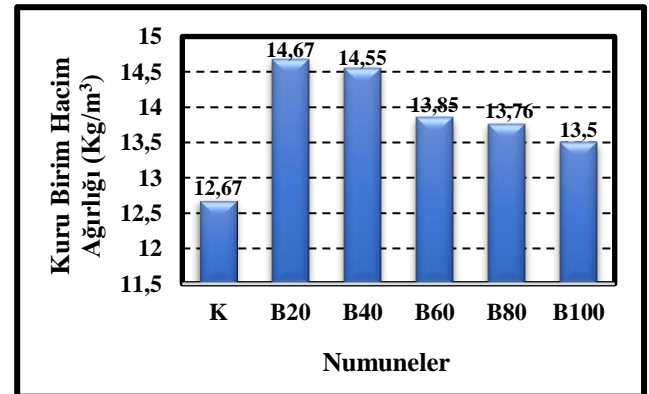
Barit Özellikleri

Ağır beton üretiminde sıklıkla tercih edilen baritin özgül ağırlığı $4.2-4.6 \text{ kg/dm}^3$ arasında olup, erime noktası yaklaşık olarak $1580 \text{ }^\circ\text{C}$ 'dir. Barit soğuk asit ve su içerisinde erimez. Ancak kaynayan sülfürik asit içerisinde az miktarda eriyebileceği belirlenmiştir. Yaklaşık olarak %90 saflıktaki bu kayaç kırma taş olarak kullanılabilmektedir. Baritin kimyasal bileşimi en çok baryum mineralinden oluşmaktadır. Baritin içerisinde demir ve karbon bulunması nedeniyle farklı renklerde (kırmızı, kahverengi, sarı, siyah, mavi) olabilmektedir. Baritin içeriğini yaklaşık %94'ü saf BaSO_4 oluşturmakta olup, ayrıca demir oksit, silis ve pirit mineralleri bulunmaktadır. Ağır beton üretmek için kullanılan baritin içeriğinde (daha yüksek dayanım elde edebilmek için) %3-5 oranında silis minerali içeren kayalar tercih edilmektedir [43]. Barit özgül ağırlığı yüksek olmasına rağmen kolayca ufalanabildiğinden beton üretiminde karıştırma aşamasında özenli olmak gerekmektedir. Doğal durumdaki barit cevheri Şekil 15'de gösterilmiştir. Barit kayaları ülkemizde kolay ulaşılabilir olmaları nedeniyle ağır agregalı beton üretiminde sıklıkla kullanılmaktadır [44],[45].



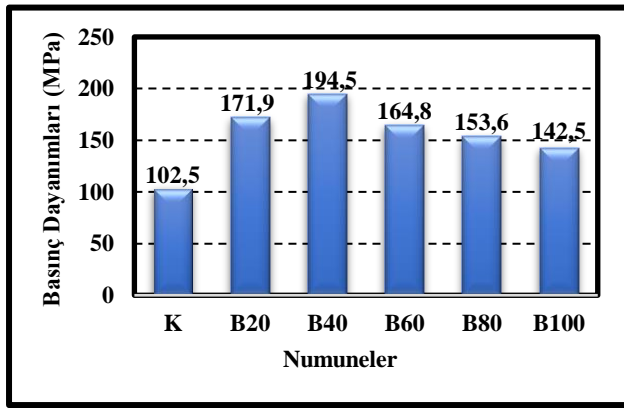
Şekil 15. Barit cevheri [1].

Radyasyona dirençli bir beton üretmek, yüksek basınç dayanımı ve yüksek dayanıklılık ile mümkün olabilmektedir.



Şekil 16. Barit oranı kuru birim hacim ağırlıkları [43].

Çünkü beton bünyesinde çatlaklar meydana gelmesi durumunda x ve γ ışınları beton içerisinden kolaylıkla geçebilmektedir. Şekil 16 beton sınıfına göre kuru birim hacim ağırlıklarını karşılaştırmaktadır. Yukarıdaki şekilde, K ile kontrol numunesi gösterilmiş, devamında ise karışımdaki baritin artması ile birlikte sırasıyla %20, 40, 60, 80 ve 100 oranındaki karışımların değerleri verilmiştir. Şekil 17'de kuru birim hacim ağırlık barit kullanımı ile kontrol numunesine göre artmış fakat barit yüzdesi arttıkça düşmüştür [43]. Şekil 17'de görüleceği üzere karışımdaki barit yüzdesinin artması ile basınç dayanımında kayda değer artışlar gerçekleşmiştir. Fakat barit oranının %100 kullanılması, %40'a göre daha az basınç dayanım değeri sağlamıştır, bunun nedeni kullanılan barit tozunun dayanıma olumsuz etki etmesidir [43].



Şekil 17. Öğütülmüş barit oranı basınç dayanımları [43].

Hematit Özellikleri

Hematit agregasının kimyasal bileşimi Fe_2O_3 'tür. Hematit madeni çelik grisi-siyah, pak siyah renklidir. Sertlik derecesi 5-6 arasında değişmekle beraber özgül ağırlıkları 5.26'dır. Bir demir minerali olan hematit agregası hidrotermal damarlarda ve magmatik kayalarda aksesuar minerali olarak bulunmaktadır [1].

Limonit Özellikleri

Limonit ($Fe_2O_3 \cdot xH_2O$), genellikle sarı renkli, yumuşak veya kahverengi, sert bir demir minerali olup, demir cevheri içerdiği için pigment olarak da kullanılmakta, %60 demir cevheri içeriğinden ağır beton üretiminde de kullanılmaktadır. Sertliği 5-5.5 değerleri arasında olup yoğunluğu $3.8-4.3 \text{ gr/cm}^3$ arasında olmaktadır. Saf limonit %60 oranında demir %14 oranında ise su içermektedir. Rengi demir siyahıdır [1]. Limonit, manyetit ve hematit'den daha düşük kalitede olarak başlıca Fransa, Küba ve Kanada'da bulunmaktadır. Esen [46] normal ve limonit donatılı betonun radyasyon zırhlama özellikleri ve bazı fiziksel ve mekanik özellikleri üzerinde deneysel bir çalışma yapmıştır. Bu amaçla standartlara göre hazırlanan normal betonlar yerine aynı oranlarda limonit eklenmesi ile

agregalar hacimce yaklaşık olarak %20, 40, 60, 80 ve 100 oranlarında azaltılmış ağır beton karışımları hazırlamıştır. Limonit takviyesi ile üretilen betonun su emme miktarı artmış, basınç ve eğilme dayanımı ise azalmıştır. Ayrıca radyasyon geçirgenliği de önemli ölçüde azalmıştır.

İlmenit Özellikleri

$Fe^{+2}TiO_3$ formülü olan ilmenit cevheri birçok magmatik ve metamorfik kayalarda bulunan bir aksesuar minerali olup, masif, taneseli bir kristal biçimine sahiptir. Sertlik indeksi 5-6 değerleri arasında, özgül ağırlığı ise 4,72'dir. İlmenit cevheri siyah-kahverengimsi renge sahiptir. İlmenit cevheri hematitten çizgilerinin renkleriyle ayrıştırılmaktadır. Pegmatitlerde, kuvars damarlarında ve bazı gnaylarda kalkopirit ve hematit ile bulunmuştur [1].

Manyetit Özellikleri

Manyetit kimyasal bileşimi Fe_3O_4 , kristal kafes yapısı kübik, 5,5-6,5 derecesinde sertliğe sahiptir. Metalik bir parlaklığa sahip olan bu agreganın yoğunluğu $5,175-5,197 \text{ gr/cm}^3$ değerleri arasındadır. Manyetit agregasını diğer agregalardan ayıran en önemli özelliği kuvvetli çekme kabiliyeti ve siyah çizgi rengine sahip olmasıdır. Manyetitler metamorfik kayalarda, sülfid yataklarında, pegmatitlerde vb. kayalarda oluşmaktadır [1].

Ferrosfor Özellikleri

Ferrosfor, yüksek özgül ağırlığı nedeniyle ağır beton yapımında kullanılan bir mineraldir. Bu mineral fosfor üretiminde meydana gelmekte, doğal ve yapay agrega olarak zırh betonu üretmek için kullanılmaktadır. İçeriğinde yaklaşık olarak %70 oranında demir bulunmaktadır. Özgül ağırlığı yaklaşık olarak 5,72-6,8 arasındadır. Ferrosfor cevherleri sıkıştırıldığında yüksek basınçlı gazlar oluşturmaktadır. Bu nedenle bu agregalar betonda kullanılmadan önce laboratuvarında test edilmelidir [15].

Siderit Özellikleri

Kimyasal bileşimi $FeCO_3$ olan siderit cevheri, hegzagonal kristal kafes yapısına sahiptir. Sertliği 3,5-4, özgül ağırlığı 3,96'dır. Siderit cevheri genellikle açık sarı, sarı gri karışımı, açık yeşil, sarımsı kahverengi, gri, koyu kahverengi renklere sahip olmasının yanı sıra nadiren beyaz ya da renksiz de olabilmektedir. Ayrıca saf halde %48'e kadar demir içermektedir [1].

Kolemanit Özellikleri

Kolemanit, nötron radyasyon zırh betonlarında agrega olarak kullanılabilen doğal bir borattır. Kimyasal formülü $CaB_3O_4(OH)_3H_2O$, kristal kafes yapısına sahiptir. Şekil

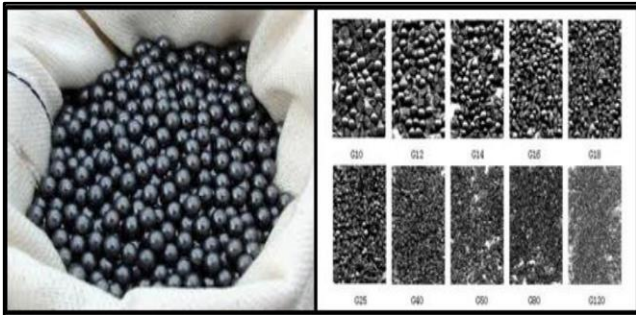
18'de görülen kolemanitin sertliği 4.5, yoğunluğu ise 2.42 g/cm³'dür. Renksiz bir yapıya sahip olan kolemanit, kristal yapısı ve dizilimi mükemmeldir. Genellikle kurak iklim bölgelerindeki tuz göllerindeki boraks ile birlikte oluşan kolemanitin görünümü Şekil 18'de gösterilmiştir [15].



Şekil 18. Kolemanit görünümü [15].

Çelik Saçma ve Parçaları

Çelik saçma ve parçaların yoğunluğu 6,2-7,8 g/cm³ arasında olup, ağır beton üretiminde yapay agrega olarak kullanılmaktadır. Çelik saçma ve parçalarına ait görünüm Şekil 19'da verilmiştir [15].



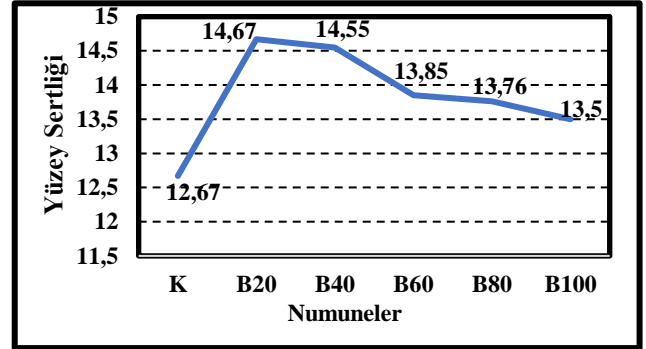
Şekil 19. Çelik saçma ve parçaların görünümü [15].

Ağır Agregaların Kullanımı

Ağır agregalar, köşelinin keskin olmaları nedeniyle beton üretiminde kullanılmaları bazı problemlerle karşılaşılmasına neden olabilmektedir. Bu sorunları bertaraf edebilmek için incelik modülü düşük agregaların tercih edilmesi gerekmektedir. Ayrıca betonun yeterli işlenebilirliği kazanabilmesi amacıyla ek tedbirlerin de alınması büyük önem arz etmektedir. Ayırışma oluşmaması için karışım tasarlanırken kaba ve ince agregaların yüksek yoğunlukta olmasına özen gösterilmelidir. Önceki yapılan araştırmalarda ağır beton üretiminde, iki aşamalı olarak (ön agrega yerleştirilmesi ve gömülü parçaların etraflarına beton dökümü) ayırışmanın azaltılabileceği belirlenmiştir [29].

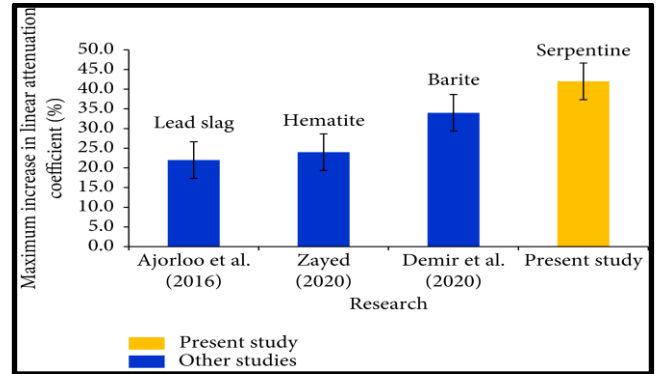
Ağır betonların aşınmalarının normal betonlara göre yüksek olması da ağır betona avantaj sağlamıştır (Şekil 20). Ancak

ağır beton ortalama büzülmesi geleneksel betonlarınkinden %30 daha fazladır. TS 3440 [47] kriterlerine göre üretilen geleneksel betonların dayanıklılıklarının yüksek olması istenmektedir. Radyasyona dirençli bir beton üretmek için ise zararlı su, zemin ve gazlara karşı önlem alınmasına gerek bulunmaz. Ancak; radyasyona dirençli ağır beton 28 günlük basınç dayanımı en az 60 MPa olmalıdır [34].



Şekil 20. Schmidt sertliğinin barit oranı ile değişimi [43].

Şekil 21, ağır betonda kullanılan kurşun cüruf, hematit, barit ve serpantin agregalarının doğrusal zayıflama katsayılarındaki artış oranlarını karşılaştırmaktadır. Serpantit ve barit agregalarıyla üretilen betonların radyasyon ışınlarını korumada daha etkili olabileceği belirlenmiştir [48]-[51].

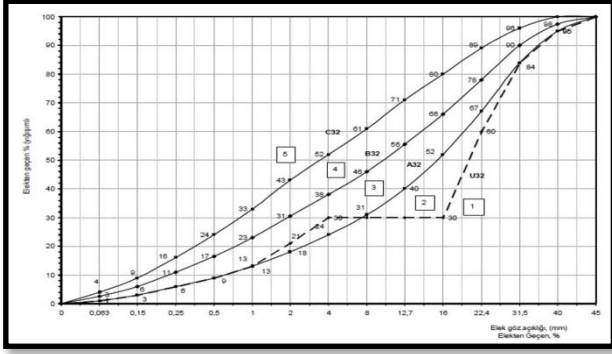


Şekil 21. Ağır beton üretiminde kullanılan kurşun cüruf, hematit, barit ve serpantin agregalarının doğrusal zayıflama katsayılarındaki artış oranlarının karşılaştırılması [8].

Ağır Betonların Karışım Yöntemleri

Ağır beton karışım hesap yöntemlerinde TS 802 [52]'de belirtilen yöntemlerle uygulanmaktadır. Ağır beton tasarımında kullanılan özel ve yoğunluğu yüksek olan agrega daneleri arasında boşluk oranı ve çatlama riskinin en az düzeyde olacak şekilde tasarlanmasına dikkat edilmelidir. Homojen ve dayanıklı ağır beton elde etmek için agrega granulometri eğrisinin Şekil 22'de belirtilen standartlarda verilen eğriler arasında kalmasına özen gösterilmelidir.

Ayrıca ağır beton üretimi sırasında karışım düzgün bir şekilde karıştırılmalı, sonra yerleştirilme işlemlerinin doğru yapılmasına, çimentonun hidrasyon reaksiyonunun sağlanması için uygun miktarda karışım suyu kullanılmasına dikkat edilmelidir. Beton tasarımındaki en önemli husus s-ç oranının seçimi olmaktadır. Seçilen çimento dozajının hem radyoaktif geçirimsizlik için yüksek olması hem de rötreten kaynaklanan çatlakların oluşmaması için çimento dozajı 350 kg/m^3 'den büyük ve s/ç oranı 0.50'nin altında olmalıdır [1].



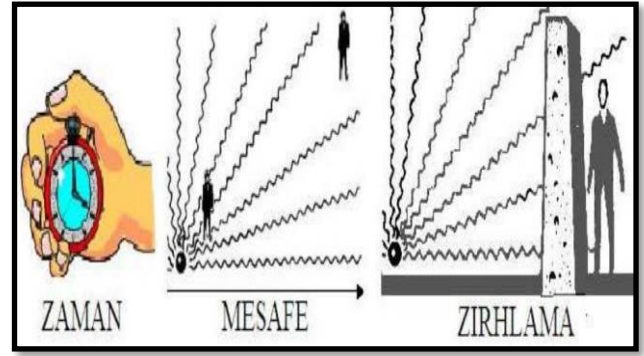
Şekil 22. D_{maks} . 16 mm agrega granülometri eğrisi [1].

Ağır Betonun Yerine Yerleştirilmesi

Bilinen yöntemler karıştırma ve yerleştirme için kullanılabilir. Bununla birlikte mikserin aşırı yüklenmesine genellikle çelik türü ağır agregalar yol açmaktadır. Betonun yerleşmesi vibrasyon ile sağlanmaktadır. Ağır beton içerisinde kullanılacak olan karışım suyunun ise temiz ve berrak olmasına dikkat edilmeli ve içinde kil, yağ, alkali ve asitler bulunmamalıdır [1]. Ağır beton üretim aşamasında mikserin tamamen doldurulmaması gerekmektedir. Aşırı karıştırma iri agreganın dibe çöküp taze betonun ayrışmasına yol açmaktadır. Ağır agregaların, temel sorunlarından biri ayrışma oluşturmalarıdır. Beton tabakası en fazla 25 cm kalınlığında olması gerekmektedir [43]. Ağır betonların iletilmesinin zor olan yapılarda enjeksiyon ya da prepaqt teknikleri uygulanmalıdır [15]. Bu amaçla harçlarda özgül ağırlığı 3.0-3.5 arası olan barit kumu ve yaklaşık 0.8 s-ç oranı kullanılır. Bu yöntem normal beton yerleştirilmesinde de kullanılmaktadır.

Radyasyondan Korunma

Günümüzde radyasyonun insanlar üzerindeki olumsuz etkileri oldukça fazla olduğundan radyasyona olabildiğince az maruz kalınmalıdır. Radyasyondan kaçınılması imkânsız olduğu durumlarda ise birtakım önlemlerin alınması gerekmektedir. Bu sürecin tamamına radyasyondan korunma denir. Serbest ve dış kaynaklı radyasyon etkisinden kaçınmanın 3 önemli yolu Şekil 23'de gösterilmiştir [23],[29]. Radyasyonun zırhllanması; radyasyonun nasıl oluştuğunu, malzemede nasıl değişiklikler gösterdiğini ve alınması gereken önlemleri inceleyen bir bilim dalıdır.



Şekil 23. Dış radyasyondan korunmanın kuralları [29].

Zaman Kuralı (Time Rule)

Radyasyon yayılımının olduğu tehlikeli bir bölgede vücudun maruz kaldığı radyasyon etkisi zamanla doğru orantılıdır, yani bulunan bölgede ne kadar fazla kalınırsa maruz kalınan doz da o derece artmaktadır. Dolayısıyla böyle bir tehlike durumunda bölgeden acilen uzaklaşılmalı ve bölge tecrit edilmelidir. Tehlikeli hal bitene kadar hiçbir canlının bölgeye girilmesine izin verilmemelidir [23],[29].

Uzaklık Kuralı (Distance Rule)

Radyasyonu oluşturan kaynaktan uzaklaştıkça radyasyonun oluşturabileceği olumsuz etki de azalabilmektedir. Bu nedenle radyasyondan korunmanın en etkili yolu radyasyon kaynağından uzaklaşmaktır [34].

Zırhlama Kuralı (Shielding Rule)

Radyasyon oluşturan merkez ile diğer canlılar arasında, bu etkiyi azaltacak engeller konulması zırhlamadır. Bu engeller ağır betonlar ve kurşun levhalar ile olmaktadır [53].

Radyolojik Olaylar ve Kazalar

Teknolojik gelişmeler ile artan radyoaktif madde kullanımı nükleer kazaların meydana gelmesine neden olabilmektedir. Bilim insanları oluşabilecek nükleer kazaların boyutunu belirlemek için yeni bir yöntem geliştirmişlerdir. Geliştirilen ölçeğe göre iki seviye arasında 10 kat önemli olayların olduğu belirlenmiştir.



Şekil 24. Uluslararası nükleer ve radyolojik ölçeği [29].

Uluslararası nükleer ve radyolojik olay ölçeği Şekil 24’de gösterilmiştir. Şekil 24 incelendiğinde radyasyonun çok geniş bir alana etki edebileceği belirlenmiştir. Örnek olarak Ukrayna’da meydana gelen nükleer kaza (Çernobil) çok geniş bir bölgeyi etkilemiştir. Verilebilecek bir diğer örnek ise Japonya’da 2011’de meydana gelen deprem sonrası tsunami oluşması ve Fukushima Daiichi Nükleer Enerji Santrali’nde büyük hasar oluşturmasıdır. Bu nükleer hasar yaklaşık 500 bin kişinin evlerinden olmasına neden olmuştur [29].

Sonuç ve Öneriler

Bu araştırma ile ağır betonlar ve ultra yüksek dayanımlı ağır betonlar üzerine yapılmış son yıllardaki çalışmalar derlenmiştir. Araştırma sonucunda ağır betonlar hakkında genel bilgiler verildikten sonra, bu konu hakkındaki yenilikler ve gelişmeler gözden geçirilmiştir. Çalışmadan çıkarılacak genel sonuçlar aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir.

- Ağır betonda dozaj 350 kg/m^3 ’den fazla ise hidrasyon ısısı düşük çimentolar kullanılmalıdır. Ağır betonlarda agreganın ağırlığı nedeniyle ayrışma riski bulunmaktadır. Bunu önlemek için karıştırma süresi olabildiğince az tutulmalı ve agreganın dağılımında ince taneler seçilmelidir

- Ağır betonlar normal betonlara göre oldukça yüksek miktarda radyasyon ışınlarını soğurabilmektedir. Siderit agregalarıyla üretilen ağır betonlarda en iyi ultrases değerleri elde edilmiştir. Kırmataş agregası ile üretilen normal betonların ve barit agregası kullanılarak üretilen ağır betonların ultrases değerlerinin birbirine yakın oldukları gözlenmiştir.
- Ağır betonlarda %40 oranında barit kullanılması, radyasyon güvenliği açısından optimum sonucu vermektedir. Kendiliğinden yerleşen ağır betonun özellikle deprem riski yüksek olan bölgelerde yapı ağırlığının artırılmasıyla beraber yapıya gelecek deprem kuvvetinin artmasına neden olacağından konut tipi yapılarda kullanılmamalıdır.
- Ağır beton üretiminde barit ve serpantin agregalarının kullanılması önerilmektedir.
- Nükleer açıdan tehlikeli yapılarda (nükleer santral vb.) ve radyasyon açısından yalıtım yapılması gereken yapı elemanlarında (hastanelerde radyoaktif zırh gereken kısımlarda) ağır betonların kullanılması insan ve çevre sağlığı açısından büyük önem arz etmektedir.

Literatürdeki araştırmalar incelendiğinde, ülkemizin bilim insanları radyasyona dirençli beton üretimi üzerine en çok araştırma yapan ülkeler arasındadır. Türkiye bilim insanları tarafından bu konuyla ilgili 2022 yılı sonuna kadar toplam 52 araştırma yapılmış olup, çalışmalarına toplam 2040 atıf almıştır. Radyasyonun etkileri ve korunması için ağır betonlar hakkında daha kapsamlı çalışmalar yapılması ile insan sağlığı ve çevre sağlığı korunabilir.

Kaynaklar

- [1] Z. Topçuoğlu, “Barit Agregası Kullanılarak Kendiliğinden Yerleşen Ağır Beton Üretebilirliğinin Araştırılması,” YL Tezi, Fırat Üniv., FBE, 78s, 2021.
- [2] M. H. Lai, K. J. Wu, X. Cheng, J. C. M. Ho, J. P. Wu, J. H. Chen, A. J. Zhang, “Effect of fillers on the behaviour of heavy-weight concrete made by iron sand,” *Progress in Nuclear Energy*, 332, 127357, May. 2022.
- [3] M.U. Khan, S. Ahmad, A. A. Naqvi, H. J. Al-Gahtani, “Shielding performance of heavy-weight ultra-high-performance concrete against nuclear radiation,” *Progress in Nuclear Energy*, 130, 103550, Dec. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2020.103550>
- [4] R. Farokhzad, A. Dadashi, A. Sohrab, “The effect of ferrophosphorus aggregate on physical and mechanical properties of heavy-weight concrete,” *Progress in Nuclear Energy*, 299, 123915, Sep. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123915>
- [5] M. O. Azeez, A. Shamsad, U. Salah, M. M. Al-Dulajjan, A. N. Akhtar, “Radiation shielding performance of heavy-weight concrete mixtures,” 284-291, 224, Nov. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.077>
- [6] O. Lotfi-Omran, A. Sadrumontazi, I.M. Nikbin, “The influences of maximum aggregate size and cement content on the mechanical and radiation shielding characteristics of heavyweight concrete,” *Progress in Nuclear Energy*, 121, March 2020. 103222. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2019.103222>
- [7] B. Aygün, “Neutron and gamma radiation shielding properties of high-temperature-resistant heavy concretes including chromite and wolframite,” *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 2019, Vol. 12, No. 1, pp. 352-359, Jan. 2019. <https://doi.org/10.1080/16878507.2019.1672312>
- [8] A. Ardiansyah, T. Dahlang, H. Heryanto, A. Bidayatul, S. Hassan, S. Abdelmoneim, A. B. David, “Science mapping for concrete composites as radiation shielding: A review,” *Radiation Physics & Chemistry*, Vol.207, 110835, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2023.110835>

- [9] C. Chen, C. Li, G. Reniers, F. Yang, "Safety and security of oil and gas pipeline transportation: a systematic analysis of research trends and future needs using WoS," *J. Clean. Prod.*, Vol. 279, 123583, Jan. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123583>
- [10] M. Ding, H. Zeng, "A bibliometric analysis of research progress in sulfate-rich wastewater pollution control technology," *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, Vol. 238, 113626, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.113626>
- [11] Z. Pei, S. Chen, L. Ding, J. Liu, X. Cui, F. Li, F. Qiu, "Current perspectives and trend of nanomedicine in cancer: a review and bibliometric analysis," *J. Contr. Release* vol. pp. 352, 211-241. Dec. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2022.10.023>
- [12] K. G. Mahmoud, M. S. Alqahtani, O. L. Tashlykov, V. S. Semenishchev, M. Y. Hanfi, "The influence of heavy metallic wastes on the physical properties and gamma-ray shielding performance of ordinary concrete: Experimental evaluations," *Radiation Physics and Chemistry*, vol. 206 110793, May. 2023.
- [13] M. F. Gashti, S. H. G. Mousavinejad, S. J. Khaleghi, "Evaluation of gamma and neutron radiation shielding properties of the GGBFS based geopolymer concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 367, 130308, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130308>
- [14] R. Mehrnejad, "Nötron Radyasyona Karşı Zırhlama Amacıyla Karma Lifli Ağır Beton Üretimi," FBE, Atatürk Üniv., Erzurum, Doktora Tezi, 2015.
- [15] E. Bakırhan, "Kurşun Maden Atığı Katkılı Ağır Betonların Radyasyon Soğurma Katsayılarının 662-1460 Kev Enerji Aralığında İncelenmesi," YL Tezi, Gümüşhane Üniv., FBE, Gümüşhane, 2017.
- [16] M. Demirci, "Pirit, Krom ve Magnetit Agregalı Ağır Betonların Mekanik ve Radyasyon Soğurma Özelliklerinin Tayini," YL Tezi, Recep Tayyip Erdoğan Üniv., FBE, Rize, 2018.
- [17] M.H. Kharita, S. Yousef, M. AlNassar, "The effect of carbon powder addition on the properties of hematite radiation shielding concrete," *Progress in Nuclear Energy*, Vol. 51, pp. 388-392, March 2009. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2008.10.002>
- [18] I.M. Nikbin, R. Mohebbi, S. Dezhampahan, S. Mehdipour, R. Mohammadi, T. Nejat, "Gamma ray shielding properties of heavy-weight concrete containing Nano-TiO₂," *Radiat. Phys. Chem.*, Vol. 162, pp. 157-167, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2019.05.008>
- [19] D. Rezaei Ochbelagh, S. Azimkhani, H. Gasemzadeh Mosavinejad, "Effect of gamma and lead as an additive material on the resistance and strength of concrete," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 241, No. 6, pp. 2359-2363, Jun. 2011. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2011.03.001>
- [20] İ. Akkurt, H. Akyıldırım, B. Mavi, S. Kılınçarslan, C. Başyigit, "Yüksek fırın curüflu betonların radyasyon soğurma karakteristiklerinin belirlenmesi," *Eng. Sci.*, Vol. 6, No. 4, 2011.
- [21] T. Korkut, A. Karabulut, G. Budak, B. Aygun, O. Gencel, A. Hancerliogullari, "Investigation of neutron shielding properties depending on number of boron toms for colemanite, ulexite and tinal ores by experiments and FLUKA Monte Carlo simulations," *Applied Radiation and Isotopes*, Vol. 70, no.1, pp. 341-345, 2012. <https://dx.doi.org/10.1016/j.apradiso.2011.09.006>
- [22] D. Revuelta, A. Barona, D. Navarro, "Measurement of Properties and of The Resistance to Segregation in Heavyweight, Self-Compacting Barite Concrete," *Materiales de Construcción*, Vol. 59, pp. 31-44, July 2009.
- [23] S.İ. Çakı, "Ağır Betonların Elastisite Modülünün Modellenmesi," S. Demirel Üniv., FBE, Isparta, 2013.
- [24] B. Güreş, "Kahramanmaraş (Şekeroba) Baritinin Ağır Beton Tasarımında Paketleme Modeliyle Değerlendirilmesi," İTÜ, FBE, İstanbul, 2018.
- [25] M. U. Khan, S. Ahmad, A. A. Naqvi, H. J. Al-Gahtani, "Shielding performance of heavy-weight ultra-high-performance concrete against nuclear radiation," *Progress in Nuclear Energy*, Vol.103, 103550, Dec. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2020.103550>
- [26] T.A. El-Sayed, "Performance of heavy weight concrete incorporating recycled rice straw ash as radiation shielding material," *Progress in Nuclear Energy*, Vol.135, 103693, May. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2021.103693>
- [27] B. Aygün, E. Şakar, O. Agar, M. I. Sayyed, A. Karabulut, V. P. Singh, "Development of new heavy concretes containing chrome-ore for nuclear radiation shielding applications," *Progress in Nuclear Energy*, vol. 133, 103645, March 2021. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2021.103645>
- [28] H. S. Gökçe, "Yüksek Kıvama Sahip Barit Agregalı Ağır Betonların Segregasyon Özellikleri ve Γ Işını Soğurma Katsayılarının Belirlenmesi," Doktora Tezi, Ege Üniv., FBE, İzmir, 2018.
- [29] M. Gümüş, "Yüksek Sıcaklığa Maruz Bırakılan Polipropilen Lifli Ağır Betonların Γ Işını ve Nötron Soğurma Performansları," YL tezi, Kırıkkale Üniv., FBE, Kırıkkale, 2019.
- [30] D. Erdek "Yüksek kıvamlı barit agregalı ağır betonların radon salınım hızlarının ölçülmesi," YL tezi, Ege Üniv., Nükleer Fizik Yüksek Bölümü, İzmir, 2021.
- [31] H. E. Johns, J. R. Cunningham, "The Physics of Radiology," 4th ed., C. Thomas, 1983. <http://moreauhupet.hopto.org>
- [32] B. T. Price, C. C. Horton, K. T. Spinney, "Radiation Shielding, Pergamon Press," London-NewYork, 1957.
- [33] İ. Akkurt, H. Akyıldırım, A. Calık, O. B. Aydar, N. Uçar, "Gamma Ray Attenuation Coefficient of Microalloyed Stainless Steel," *Arabian Journal for Science and Engineering*, Vol. 36, pp. 145-149, Jan. 2011. <https://doi.org/10.1007/s13369-010-0013-9>

- [34] D. Kaya, "Normal Beton ve Özel Amaçlı Betonların Γ Radyasyonunu Zırlama Özelliklerinin İncelenmesi," YL Tezi, İTÜ, Enerji Enst., İstanbyl, 2019.
- [35] J. E. Martin, "Physics for Radiation Protection," 2nd Ed., in *Wiley-VCH Verlag GmbH & Co.*, Weinheim, USA, 2006, pp. 84.
- [36] R. G. Jaeger, E. P. Blizard, A. B. Chilton, A.B., M. Grotenhuis, A. Hönl, T. A. Jaeger, H. Eisenlohr, "Engineering Compendium on Radiation Shielding," *Springer-Verlag*, pp. 537, New York, 1968.
- [37] I.I. Bashter, "Calculation of radiation attenuation for shielding concrete," *Annals of Nuclear Energy*, Vol. 24, No. 17, pp. 1389-1401, 1997.
- [38] J. Shapiro, "Radiation Protection," *A Guide for Scientists, Regulators, and Physicians, Fourth Edition*, Harvard University Pres. Cambridge, pp. 688, 1972.
- [39] J. H. Hubbell, "Photon Mass Attenuation and Energy Absorption Coefficients from 1 keV to 20 MeV," *Int. J. Appl. Radiat. Isot.*, Vol. 33, pp. 1269, 1982.
- [40] H. Akyıldırım, "Ağır Betonların Nükleer Radyasyon Zırlama Özelliklerinin Araştırılması," Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniv., FBE, Isparta, 2011.
- [41] K. Arshak, O. Korostynska, "Advanced Materials and Techniques for Radiation Dosimetry," *Artech House*, pp. 220, London, 2006.
- [42] İ.B. Topçu, T. Uygunoğlu, Yapı Malzemesi, Nobel Akademik Yayıncılık, 396s, 2021.
- [43] B. Yılmaz, "Muş Yöresinden Temin Edilen Baritin Kullanımı İle Elde Edilen Ağır Betonun Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması," FBE, Fırat Üniversitesi, Elazığ, YL Tezi, 2009.
- [44] İ.B. Topçu, "Properties of heavyweight concrete produced with barite," *Cement and Concrete Research*, vol. 33, no. 6, pp. 815-822, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)01063-3](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)01063-3)
- [45] İ.B. Topçu, A. Uğurlu "Barit ile üretilen ağır betonlar üzerine bir çalışma," *Beton Prefabrikasyon*, vol. 67, pp. 51-57, Tem. 2003.
- [46] Y. Esen, A. Kurt, E. Orhan, "Öğütülmüş Barit İle Üretilen Betonun Basınç Dayanımı ve Fiziksel Özelliklerinin Deneysel Olarak Araştırılması," *Eng. Sci.*, Vol. 6, No. 4, pp. 1281-1290, 2011.
- [47] TS 3440, Betona zararlı etkileri olan su, zemin ve gazların değerlendirilmesi - Prensipler, sınır değerler, su ile zemin numunelerinin alınması ve analizleri, TSE, Ankara, 2019.
- [48] A. Sayyadi, Y. Mohammadi, M. R. Adlparvar, "Mechanical, Durability, and Gamma Ray Shielding Characteristics of Heavyweight Concrete Containing Serpentine Aggregates and Lead Waste Slag," *Advances in Civil Engineering*, pp. 1-11, 7873637, 11. 2023. <https://doi.org/10.1155/2023/7873637>
- [49] A. Ajourloo, A. Yadolahi, A. Zolfaghari, "Protection against gamma rays with heavy concrete application of lead slag-containing," *Journal of Engineering Geology*, Vol. 9, No. 4, pp. 3193-3206, 2016. <https://doi.org/10.18869/acadpub.jeg.9.4.3193>
- [50] A. M. Zayed, M. A. Masoud, A. M. Rashad, A. M. El-khayatt, K. Sakr, W. A. Kansouh, M. G. Shahien, "Influence of heavyweight aggregates on the physico-mechanical and radiation attenuation properties of serpentine-based concrete," *Construction and Building Materials*, Vol. 260, 120473, Nov. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120473>
- [51] F. Demir, G. Budak, R. Sahin, A. Karabulut, M. Oltulu, A. Un, "Determination of radiation attenuation coefficients of heavyweight and normal-weight concretes containing colemanite and barite for 0.663 MeV c-rays," *Annals of Nuclear Energy*, Vol. 38, No. 6, pp. 1274-1278, 2011.
- [52] TS 802 "Beton Karışım Tasarımı Hesap Esasları" TSE, Ankara, Mart 2016.
- [53] İ. Akkurt, C. Başığit, S. Kılınçarslan, B. Mavi, "The shielding of γ -rays by concretes produced with barite," *Progress in Nuclear Energy*, vol. 46, no. 1, pp. 1-11, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2004.09.015>