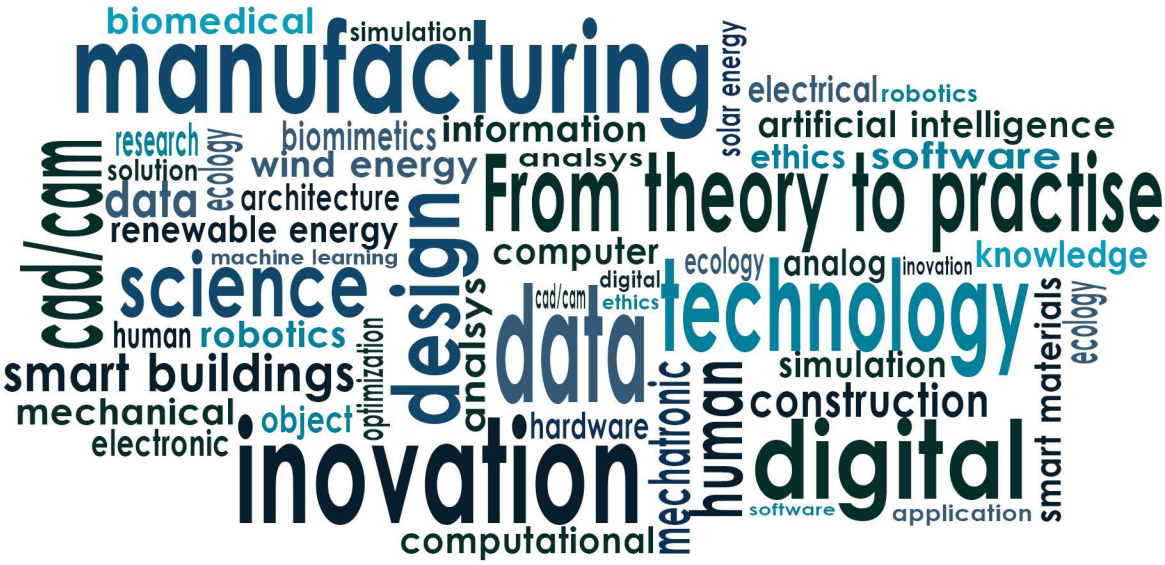
Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi

International Journal of Technological Sciences

Elektronik Dergi, e-ISSN: 1309-1220

Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi

UTBD IJTS



Uluslarası Teknolojik Bilimler Dergisi

International Journal of Technolojical Sciences

Sahibi / Owner	Yayın Yönetmeni / Publishing Manager
Dr. Ali Kemal YAKUT	Dr. Reşat SELBAŞ

Editör / Editor in Chief	Yardımcı Editörler / Vice Editors
Dr. Nihat YILMAZ	Dr. Önder KIZILKAN Dr. Ergün KORKMAZ

Editör Kurulu / Editorial Board

Dr. Önder KIZILKAN
Dr. Ergün KORKMAZ
Dr. Cengiz ÖZEL
Dr. Okan BİNGÖL
Dr. İsmail Serkan ÜNCÜ
Dr. Fatih YILMAZ
Dr. Serap ERGÜN

Yayın Danışma Kurulu/Editorial Advisory Board

Dr. Hiroshi YAMAGUCHI, Doshisha University, Japan
Dr. İbrahim DİNÇER, Ontario Tech University, Canada
Dr. Mustafa Reşit USAL, Süleyman Demirel Üniversitesi, Türkiye
Dr. Deeb Alashgar, Kyoto University, Japan
Dr. Ramazan KÖSE, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Türkiye
Dr. Farrukh Khalid, Indian Institute of Technology Guwahati, India
Dr. Shoaib Khanmohammadi, Kermanshah University of Tech., Iran
Dr. Ömer Necati CORA, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Türkiye
Dr. Mehmet Akif EZAN, Dokuz Eylül Üniversitesi, Türkiye
Dr. Nabi İBADOV, Warsaw University of Technology, Poland
Dr. Murat Öztürk, Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Türkiye
Dr. Mustafa AY, Marmara Universitesi, Türkiye
Dr. Tahir Ratlamwala, National Uni. of Sciences and Tech., Pakistan

Grafik Tasarım / Graphic Design
Sinan İLKAZ

Teknik Sorumlu / Technical Manager
Nejat TÜKENMEZ

Mizanpaj / Make-up
Dr. Serpil ÇELİK TOKER

Dergi Adresi / Journal Address
Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi Editörlüğü
Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi
Teknoloji Fakültesi
32260, Batı Kampüsü, Isparta, Türkiye
Tel: +90 246 2111569
Fax : +90 246 2111984
E-posta/E-mail: utbd@isparta.edu.tr

Uluslarası Teknolojik Bilimler Dergisi, Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi tarafından yılda 3 sayı elektronik olarak yayınlanmaktadır.
International Journal of Technological Sciences is published three times a year electronically by Isparta University of Applied Sciences.

Cilt / Volume: 15	Sayı/Number: 2	Ağustos/August 2023

e - ISSN : 1309-1220

ISPARTA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ

Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi
International Journal of Technological Sciences
Elektronik Dergi, e-ISSN: 1309-1220
VOLUME / CİLT 15 NUMBER / SAYI 2 AUGUST / AĞUSTOS 2023

İÇİNDEKİLER / CONTENTS Sayfa No / Page No

Araştırma Makalesi / Research Article

Güç sistemlerinde farklı güç sistemi kararlı kılıcısı modellerin sekonder gerilim kontrolü üzerindeki etkileri
Effects on secondary voltage control of different power system stabilizer models in power systems 49-58
M. Kenan Döşoğlu, Enes Kaymaz

RFID tabanlı hayvan sayım sistemi
RFID Based animal counting system 59-63
Ali Kavurur

Otonom mobil robotların güvenli veri iletimi için hibrit şifreleme yaklaşımı
A Hybrid encryption approach for secure data transmission of autonomous mobile robots 64-72
Mustafa Emre Erbil, Ahmet Ali Süzen, Hilmi Cenk Bayrakçı

Adaptive learning based content management tool for online education platforms
Çevrimiçi eğitim platformları için adaptif öğrenme tabanlı içerik yönetim aracı 73-79
Onur Mahmut Pişirir

Derleme Makalesi / Review Article

Nano-malzemelerin geopolimer betonun termal davranışlarına etkisi
The Effects of nanomaterials on the thermal behavior of geopolymer concrete 80-94
Necip Altay Eren

*Uluslarası Teknolojik Bilimler Dergisi, **Google Scholar** ve **EBSCO** tarafından taranmaktadır. https://www.ebsco.com/title-lists adresinde "Academic Search Premier" listesinde yer almaktadır.*
*International Journal of Technological Sciences is indexed by **Google Scholar** and **EBSCO**. It is included in "Academic Search Premier" at the address https://www.ebsco.com/title-lists*

Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi
International Journal of Technological Sciences

Orijinal Makale/Research Article

Güç sistemlerinde farklı güç sistemi kararlı kılıcısı modellerin sekonder gerilim kontrolü üzerindeki etkileri

M. Kenan Döşoğlu*[1], Enes Kaymaz[2]

[1,2]Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Düzce, Türkiye

Anahtar Kelimeler
Farklı GSKK modelleri
Sekonder gerilim kontrolü
OGR modeli
PSAT
Geçici kararlılık

Makale geçmişi:
Geliş Tarihi: 17.03.2023
Kabul Tarihi: 25.05.2023

Öz: Güç sistemleri hat kopması ve kısa devre gibi geçici durumlara karşı korunmasızdır. Kararsızlık problemlerini en kısa süre içerisinde ortadan kaldırmak için çeşitli modeller kullanılmaktadır. Özellikle de senkron generatör denetleyici kısımlarında Güç Sistemi Kararlı Kılıcısı (GSKK) yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada IEEE'nin 14 baralı sisteminde farklı GSKK modellerinin sekonder gerilim kontrolü ile beraber kullanılması ile geçici durum kararlılığı detaylı olarak incelenmiştir. Buna ek olarak, farklı GSKK modellerinin ve sekonder gerilim kontrolünün koordineli olarak çalışması için Otomatik Gerilim Regülatörü (OGR)'nin en uygun modeli ile beraber kullanımı düşünülmektedir. Merkezi alan kontrolü ve küme kontrolünden oluşan sekonder gerilim kontrolünün kullanımı için pilot bara belirlenmiş olup, senkron generatörde OGR ve GSKK modellerinin koordinasyon kontrolünün sağlanması amaçlanmıştır. Bu çalışma Güç Sistemleri Analizi Programı (PSAT) kullanılarak analiz edilmiştir. Farklı GSKK modellerinin kullanılması ile senkron generatör açısal hız değişimleri, bara gerilim profilleri ve senkron generatör aktif-reaktif güç değişimleri incelenmiştir. Yapılan çalışma sonucunda GSKK 2 modelinin diğer modellere göre kısa süre içerisinde sistem kararlılığını sağladığı ve salınımları azalttığı görülmüştür.

Atıf için/To Cite: Döşoğlu, M.K. Kaymaz E. Güç Sistemlerinde Farklı Güç Sistemi Kararlı Kılıcısı Modellerin Sekonder Gerilim Kontrolü Üzerindeki Etkileri. Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi, 15(2), 49-58, 2023.

Effects on secondary voltage control of different power system stabilizer models in power systems

Keywords
Different PSS models
Secondary voltage control
AVR model
PSAT
Transient stability

Article history:
Received: 17.03.2023
Accepted: 25.05.2023

Abstract: Power systems are vulnerable to transients such as line contingency and short circuit. Various models are used to eliminate instability problems as soon as possible. In particular, the Power System Stabilizer (PSS), which is one of the synchronous generator controller models, is widely used. In this study, the transient stability of IEEE's 14 bus system was investigated in detail by using different PSS models together with secondary voltage control. In addition, it is considered to use the Automatic Voltage Regulator (AVR) together with the most suitable model for the coordinated operation of different PSS models and secondary voltage control. The pilot bus has been determined for the use of secondary voltage control consisting of central area control and cluster control, and it is aimed to provide coordination control of AVR and PSS models in the synchronous generator. This study was analyzed using the Power Systems Analysis Program (PSAT). By using different PSS models, synchronous generator angular speed changes, bus voltage profiles, and synchronous generator active-reactive power changes were investigated. As a result of the study, it was seen that the PSS 2 model provided system stability and reduced oscillations in a short time compared to other models.

* İlgili yazar/Corresponding author: kenandosoglu@duzce.edu.tr

1. Giriş

Güç sistemlerinde geçici kararlılık durumlarında çalışma limitlerinin ayarlanması ve sistem güvenliğinin sağlanmasında öncelikli olarak gerilim kontrolünün sağlanması gerekmektedir. Gerilim kontrolünde en yaygın olarak kullanılan yöntemlerden birisi de sekonder gerilim kontrolüdür. Sekonder gerilim kontrolü pilot barada referansa bağlı olarak merkezi alan kontrolü ve küme kontrolünün OGR model ile koordineli çalışması olarak tanımlanmaktadır. Çok Makineli bir güç sisteminde iletim hattında empedans kontrolünü sağlamak için sekonder gerilim kontrolü kullanılmaktadır. Pilot baranın referans değeri belirlenerek kullanılan merkezi sekonder gerilim kontrolü ile farklı analiz yaklaşımları ile detaylı olarak gösterilmiştir [1]. Merkezi sekonder gerilim kontrolünün farklı bir yaklaşımı ise kritik bara gerilim profilinin belirlenmesi işlemidir. Kritik bara gerilim profili her bölgedeki yüklere uygulanan bozulmalara karşı bara gerilim duyarlılığına dayalı olarak bulunmaktadır. Sekonder gerilim kontrolünde farklı denetleyici modelleri kullanılarak oluşabilecek olumsuz durumların önceden kestirimi ile sistem kararlılığı sağlanmaktadır [2,3]. Çok makinalı güç sisteminde sekonder gerilim kontrolü kullanılarak pilot bara seçimi fazör ölçüm ünitesi ile belirlenmektedir. Farklı noktalardaki farklı fazör ölçüm birimlerinin optimal yerleşim yerleri belirlenerek geçici kararlılık durumlarında parametreler üzerinde oluşan salınımların sekonder gerilim kontrolü sayesinde sönümlenmesi sağlanmıştır [4,5]. Sekonder gerilim kontrolü güç sistemlerinin bazı çalışma koşullarında yetersiz kalabilmektedir. Bunlardan birisi kompanzasyon düşüş oranıdır. Kompanzasyon düşüşünü telafi etmek için statik ve dinamik kompanzasyon sistemleri sekonder gerilim kontrolü ile beraber koordineli bir şekilde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [6]. Kompanzasyon düşüş oranını yükseltmek için güç elektroniği tabanlı kompanzasyon sistemi Esnek AC İletim Sistemi (FACTS) elemanlarından Statik Senkron Kompanzatör (STATCOM) ve Statik Var Kompanzatör (SVC) etkili bir şekilde kullanılmaktadır. Geçici durum esnasında gerilim kontrolünün sağlanmasında STATCOM ve SVC'nin sekonder gerilim kontrolü ile beraber kullanılmasının etkili sonuçlar verdiği görülürken, bara gerilim profillerinin de iyileştiği ilgili çalışmalarda görülmektedir [7-9]. Merkezi alan kontrolü ve küme kontrolünden oluşan sekonder gerilim kontrolü, OGR modeli ile beraber kullanılmaktadır. Ancak OGR modelinin sekonder gerilim kontrolü ile koordineli çalışmasında uygun parametrelerin belirlenmesi çok önemlidir. OGR'nin uygun parametrelerin belirlenmesi sayesinde sekonder gerilim kontrolünün çok makineli güç sisteminde istenilen düzeyde sonuçlar verdiği gözlemlenmektedir [10, 11]. Dahası çok makineli güç sistemlerinde sekonder gerilim kontrolüne uygun parametrelerin belirlenmesine destek olmak için destek üçüncü gerilim kontrolü kullanılmaktadır. Hem sekonder gerilim kontrolü hem de üçüncü gerilim kontrolünün geçici durumlar karşısında koordineli çalışması ile sistem zaman cevabının hızlı olduğu ve sistemin kısa süre içerisinde kararlı bir hal aldığı ilgili çalışmalarda gösrülmektedir [12,13]. Son yıllarda kullanımı yaygın olan rüzgar türbinlerinin şebekeye bağlı olarak çalışmasında sekonder gerilim kontrolünün kullanımı popüler olmaya başlamıştır. Rüzgar türbinlerinin şebekeye bağlı olarak çalışmasında geçici durum çalışmaları için sekonder gerilim kontrolünün kullanımı çok önemlidir. Senkron generatör ve rüzgar türbinin koordineli çalışmasında OGR ile sekonder gerilim kontrolünün kullanılmasının gerilim kararlılığı açısından istenilen düzeyde sonuçlar verdiği görülmektedir [14-16].

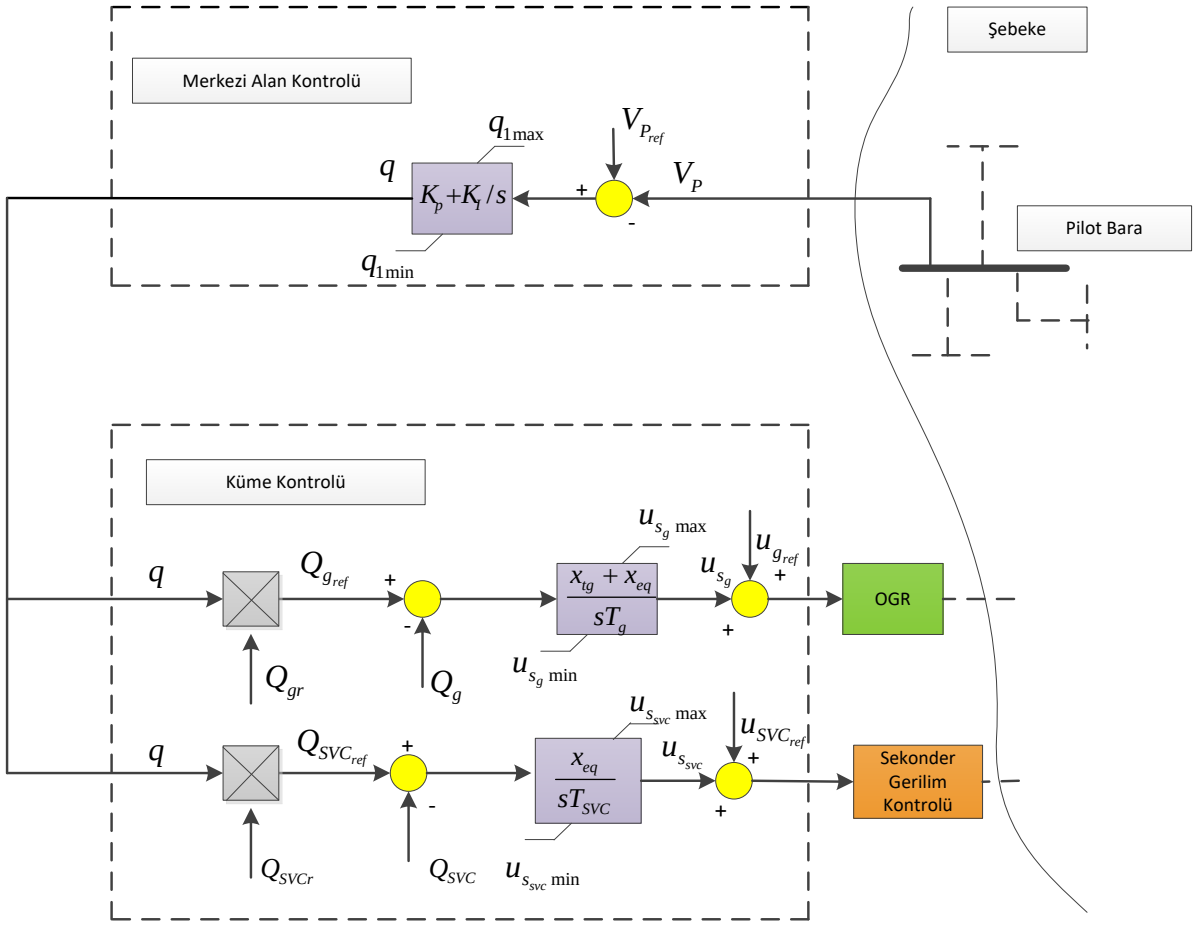
Çok makineli güç sistemlerinde kararlılık durumunun daha iyi sağlanması ve sistemin daha güvenli çalışması için senkron generatörde GSKK kullanımı çok önemlidir. Özellikle de GSKK'nın OGR ile birlikte kullanılması benzetim çalışmasında sistemin daha hızlı olarak kararlı olması ve salınımların bastırılması istenilen bir durumdur. Özellikle literatürde GSKK ve OGR'nin birlikte kullanılmasının, küçük sinyal kararlılığı üzerinde oldukça iyi sonuçlar verdiği görülmektedir [17]. Bu geliştirmeden yola çıkarak GSKK ve OGR'nin çok makineli güç sisteminde sekonder gerilim kontrolünde beraber kullanılması literatüre bir yenilik olarak görülmektedir. 3 farklı GSKK modelinin OGR modeli ile birlikte kullanılması durumu incelenerek, karşılaştırmalar yapılmıştır. Yapılan bu karşılaştırmalar detaylı olarak yorumlanmıştır.

Bu çalışmada bölüm 2'de sekonder gerilim kontrolü detaylı olarak verilirken, bölüm 3'de GSKK ve OGR modellerine yer verilmiştir. Bölüm 4'de benzetim çalışmas ve benzetim çalışması sonuçları verilmiştir. Son bölümde ise sonuçlar kısmı makalede gösterilmiştir.

2. Sekonder Gerilim Kontrolü

Senkron generatörde kullanılan sekonder gerilim kontrolü merkezi alan kontrolü ve küme kontrol modelden oluşmaktadır. Sekonder gerilim kontrolü modeli Şekil 1'de gösterilmiştir. Pilot baradan bağlantı direkt olarak merkezi alan kontrolü kısmına geçmektedir. Merkezi alan kontrolü çıkışı hem küme kontrolü hem de sekonder gerilim kontrolüne girmektedir. Bunların çıkışları senkron generatör kısmına girmektedir. Bu sekonder gerilim kontrolünün yanı sıra OGR modelinin bulunduğu kısma GSKK modeli de ilave edilmiştir. OGR modeli ve GSKK modeli senkron generatöre ardışıl olarak bağlanmıştır. Hem merkezi

alan kontrolünün hem de küme kontrolünün koordineli çalışması ile senkron generatöre bağlı bulunan OGR modellerin geçici durum esnasındaki kontrolleri sağlanmaktadır. Sekonder gerilim kontrolü için ayrıca bir pilot bara kullanılmaktadır. Bu çalışmada pilot bara IEEE 14 baralı sistemde 14 numaralı bara olarak belirlenmiştir [18]. Pilot baradaki gerekli bilgiler alınarak sekonder gerilim kontrolünü oluşturulan merkezi alan kontrolü ve küme kontrolüne aktarılmaktadır. Küme kontrol kısmında Oransal Integral (PI) denetleyici kullanılmaktadır.



Şekil 1. Sekonder gerilim kontrolü modeli

Sekonder gerilim kontrolünde kullanılan ifadeler Denklem 1 ile Denklem 4 arasında gösterilmiştir.

$$\frac{dq}{dt} = K_I (V_{\Pr ef} - V_P) \tag{1}$$

$$q = q_1 + K_P (V_{\Pr ef} - V_P) \tag{2}$$

$$\frac{dv_{Sg}}{dt} = \frac{1}{T_g}(x_{tg} + x_{eqg}) \times (Q_{gr} q - Q_g) \tag{3}$$

$$\frac{dv_{SVC}}{dt} = \frac{1}{T_{SVC}} x_{eqg\,SVC} (Q_{SVCr} q - Q_{SVC}) \tag{4}$$

Burada, v_{sg} ve v_{sSVC} OGR ve sekonder gerilim kontrolü için çıkış sinyali, x_{tg} generatöre bağlanan transformatör reaktansı x_{eqg} ve x_{eqSVC} generatör ve pilot baranın hesaplanan eşdeğer reaktansı, V_{Pref} referans pilot bara gerilimi, V_P pilot bara gerilimi, K_I ve K_P denetleyici kazancı ve kontrol kazancı, q maksimum ve minimum çıkış sinyali, q_1 durum depişkeni, T_g ve T_{SVC} generatör ve sekonder gerilim kontrol katsayılarıdır. MAK ve KK modelde anti wind-up sınırlandırıcı kullanılmaktadır.

3. GSKK ve OGR Modelleri

Güç sistemi kontrol mekanizmalarından olan güç sistemi kararlı kılıcısının (GSKK) asıl kullanım amacı geçici durumlarda senkron generatörde kullanılarak güç sisteminde oluşan salınımları sönümleyerek sistemi kısa süre içerisinde kararlı hale getirmektir. 3

farklı GSKK modeli kullanılmaktadır. Bu GSKK modellerinin matematiksel eşitlikleri Denklem 5 ile Denklem 14 arasında gösterilmiştir.

$$\dot{v}_1 = -\left(K_\omega \omega + K_p P_g + K_v V_g + v_1\right) / T_\omega \tag{5}$$

$$\dot{v}_s = \left(K_\omega \omega + K_p P_g + K_v V_g + v_1 + v_s\right) / T_e \tag{6}$$

$$\dot{v}_1 = -\frac{K\omega V_{SI} + v_1}{T\omega} \tag{7}$$

$$\dot{v}_2 = \frac{1}{T_2}\left[\left(1 - \frac{T_1}{T_2}\right)\left(K\omega V_{SI} + v_1\right) - v_2\right] \tag{8}$$

$$\dot{v}_3 = \frac{1}{T_4}\left\{\left(1 - \frac{T_3}{T_4}\right)\left[v_2 + \frac{T_1}{T_2}\left(K_\omega V_{SI} + v_1\right)\right] - v_3\right\} \tag{9}$$

$$\dot{v}_s = \frac{1}{T_e}\left\{v_3 + \frac{T_3}{T_4}\left[v_2 + \frac{T_1}{T_2}\left(K_\omega V_{SI} + v_1\right)\right] - v_s\right\} \tag{10}$$

$$\dot{v}_1 = -\frac{K_\omega V_{SI} + v_1}{T_\omega} \tag{11}$$

$$\dot{v}_2 = \frac{1}{T_4} v_3 + \frac{1}{T_4}\left(T_1 - T_2 \frac{T_3}{T_4}\right)\left(K_\omega V_{SI} + v_1\right) \tag{12}$$

$$\dot{v}_3 = -v_2 - \frac{T_2}{T_4} v_3 + \left[1 - \frac{T_3}{T_4} - \frac{T_2}{T_4}\left(T_1 - T_2 \frac{T_3}{T_4}\right)\right]\left(K_\omega V_{SI} + v_1\right) \tag{13}$$

$$\dot{v}_s = \frac{1}{T_e}\left[v_2 + \frac{T_3}{T_4}\left(K_\omega V_{SI} - v_1\right) - v_s\right] \tag{14}$$

Bu matematiksel ifadelerde; v_1, v_2 ve v_3, durum değişkenleri olup, v_s, PSS'nin çıkış sinyali ve P_g PSS'nin bağlı olduğu durumdaki aktif güç olarak ifade edilir. Ayrıca, V_g generatör gerilimi, K_v gerilim kazancı, K_p aktif güç kazancı, K_ω, PSS kazancı, T_1, T_2, T_3 ve T_4 zaman sabiti, T_e Anti-windup zaman sabiti ve T_ω arındırma sabitidir [19,20].

OGR literatürde görüldüğü gibi sekonder gerilim kontrolü ile beraber kullanılmaktaktadır. OGR'nin asıl kullanım amacı senkron generatörü çalışma koşullarına bağlı olarak referans geriliminde tutmaktır. Sürekli olarak çalışma koşullarına göre gerilim kontrolünü kullanarak çıkışını günceller ve referans gerilim ile karşılaştırma yapar. Referans gerilim değeri kullanıldığı sistem ve sürekli-geçici durum çalışmasına göre farklılık gösterebilir. Sistemin çalışma koşullarında bir değişim olduğu durumda karşılaştırma sonucuna göre bir hata sinyali oluşturarak gerilimi değiştirir. OGR'nin 3 farklı modeli kullanılmaktadır. Bu çalışmada diğer modellere göre daha iyi sonuç veren OGR 2 modeli tercih edilmiştir [11]. OGR 2 modelinin matematiksel eşitlikleri Denklem 15 ile Denklem 18 arasında gösterilmiştir.

$$\frac{dv_{r1}}{dt} = \frac{1}{T_a}\left[K_a\left(v_{ref} - v_m - v_{r2} - \frac{K_f}{T_f} v_f\right) - v_{r1}\right] \tag{15}$$

$$\frac{dv_m}{dt} = \frac{V - v_m}{T_r} \tag{16}$$

$$\frac{dv_f}{dt} = -\frac{1}{T_e}\left[v_f\left(1 + S_e\left(v_f\right)\right) - v_r\right] \tag{17}$$

$$\frac{dv_{r2}}{dt} = -\frac{1}{T_f}\left(\frac{K_f}{T_f} v_f + v_{r2}\right) \tag{18}$$

Burada, v_f geri besleme gerilimi, v_m ölçülen gerilim, v_r AVR gerilimi, $v_{r,min}$ ve $v_{r,max}$ AVR gerilimine ait üst sınır olarak ifade edilir. v_{r1} ifadesi yükseltici durum değişkeni, v_{r2} ifadesi dengeleyici durum değişkeni, ve v_f geri besleme gerilimidir, Ayrıca, μ_0 regülatör kazancını ifade ederken, T_1 - T_2 – T_3 ve T_4 ifadeleri AVR zaman sabitlerini, T_e alan devresi sabitini, T_r ölçüm süresi sabitini, S_e uyarıcının doygunluk fonksiyonunu, v_{f0} ilk alan gerilimini ve v_0 bara offset gerilimini temsil eder.

4. Benzetim Çalışması

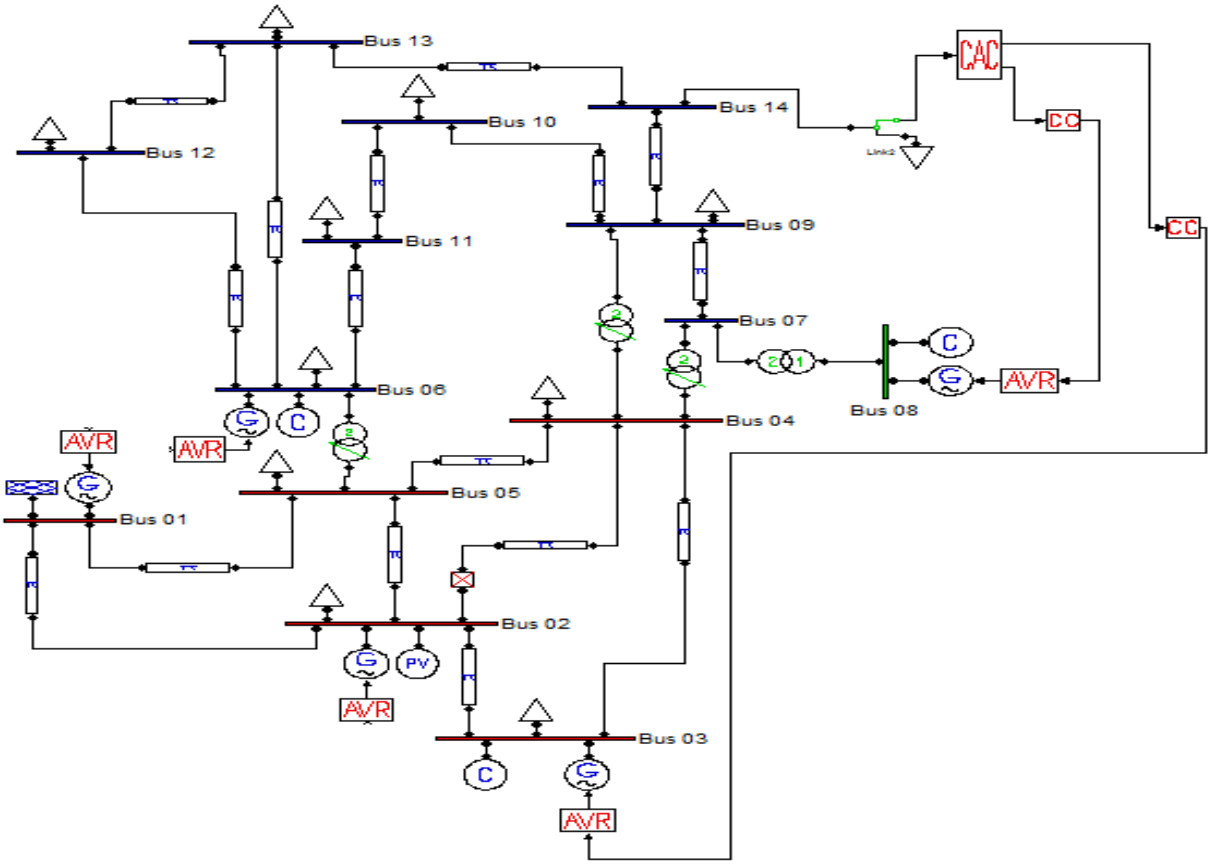
Bu çalışmada güç sistemi olarak IEEE 14 baralı sistem tercih edilmiştir. Çalışmada kullanılan çok makineli IEEE 14 baralı sistem Şekil 2'de gösterilmiştir.

IEEE 14 baralı güç sistemi, 1 adet salınım barası, 4 adet geneatör barası ve 9 adet yük barasından oluşmaktadır. Salınım barası olarak 1 numaralı bara, generator barası olarak 2, 3, 6 ve 8 numaralı baralar ve yük barası olarak ise 4, 5, 7, 9, 10, 11, 12, 13 ve 14 numaralı baralar belirlenmiştir. Bu güç sisteminde 4 tane transformatör kullanılmıştır. Salınım barası ve generatör baraları yani toplamda 5 tane barada OGR 2 modeli kullanılmıştır. 1, 2 ve 6 numaralı baralarda OGR'nin yanı sıra GSKK modelleri de kullanılmıştır. Pilot bara olarak 14 numaralı bara bu çalışma için belirlenmiştir. Pilot baranın bulunduğu kısma merkezi alan kontrol modeli bağlanırken, 3 ve 8 numaralı generatörlerin bağlı olduğu OGR modellerine küme kontrol modelleri bağlanmıştır. Bu çalışmadaki geçici kararlılık durumu hat açma-kapama olarak belirlenmiştir. Bu çalışma için hat açma-kapama olayı hat 2 ve hat 4 arasında gerçekleştirilmiştir. Sekonder gerilim kontrolünü oluşturulan merkez alan kontrolü ve küme kontrolü modellerinin bağlı olması ile senkron generatörlerde kullanılan farklı GSKK modelleri detaylı olarak karşılaştırılmıştır. Ayrıca diğer modellere göre

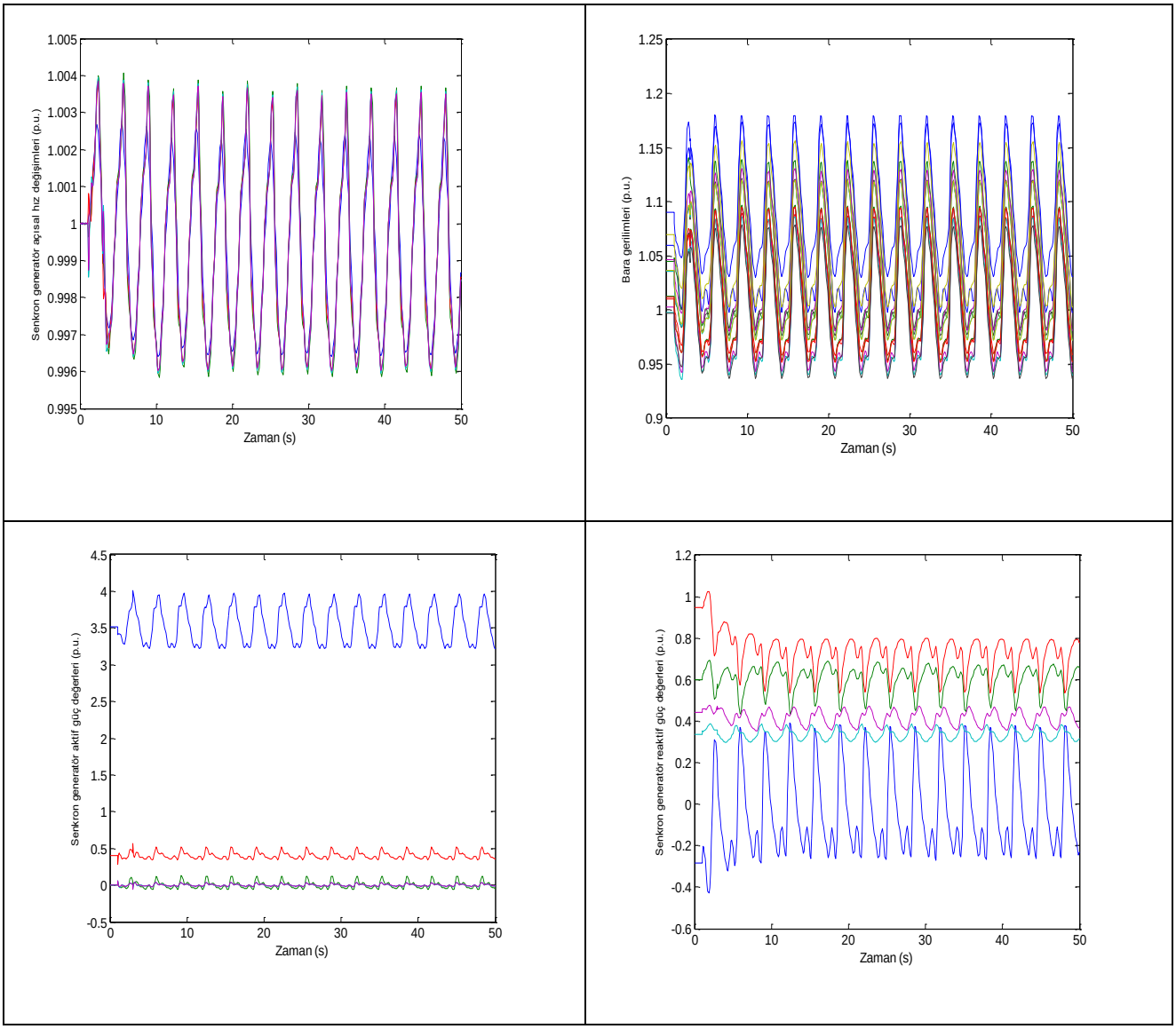
literatürde daha iyi sonuç veren OGR 2 modeli bu çalışmada tercih edilmiştir. Yapılan karşılaştırmalarda, senkron generatör açısal hız değişimleri, bara gerilimleri ve senkron generatörlere ait aktif-reaktif güç değişimleri detaylı olarak analiz edilmiştir. GSKK 1, GSKK 2 ve GSKK 3 modelleri kullanılarak analiz edilen sonuçlar detaylı olarak değerlendirilmiştir.

4.1. Benzetim çalışması sonuçları

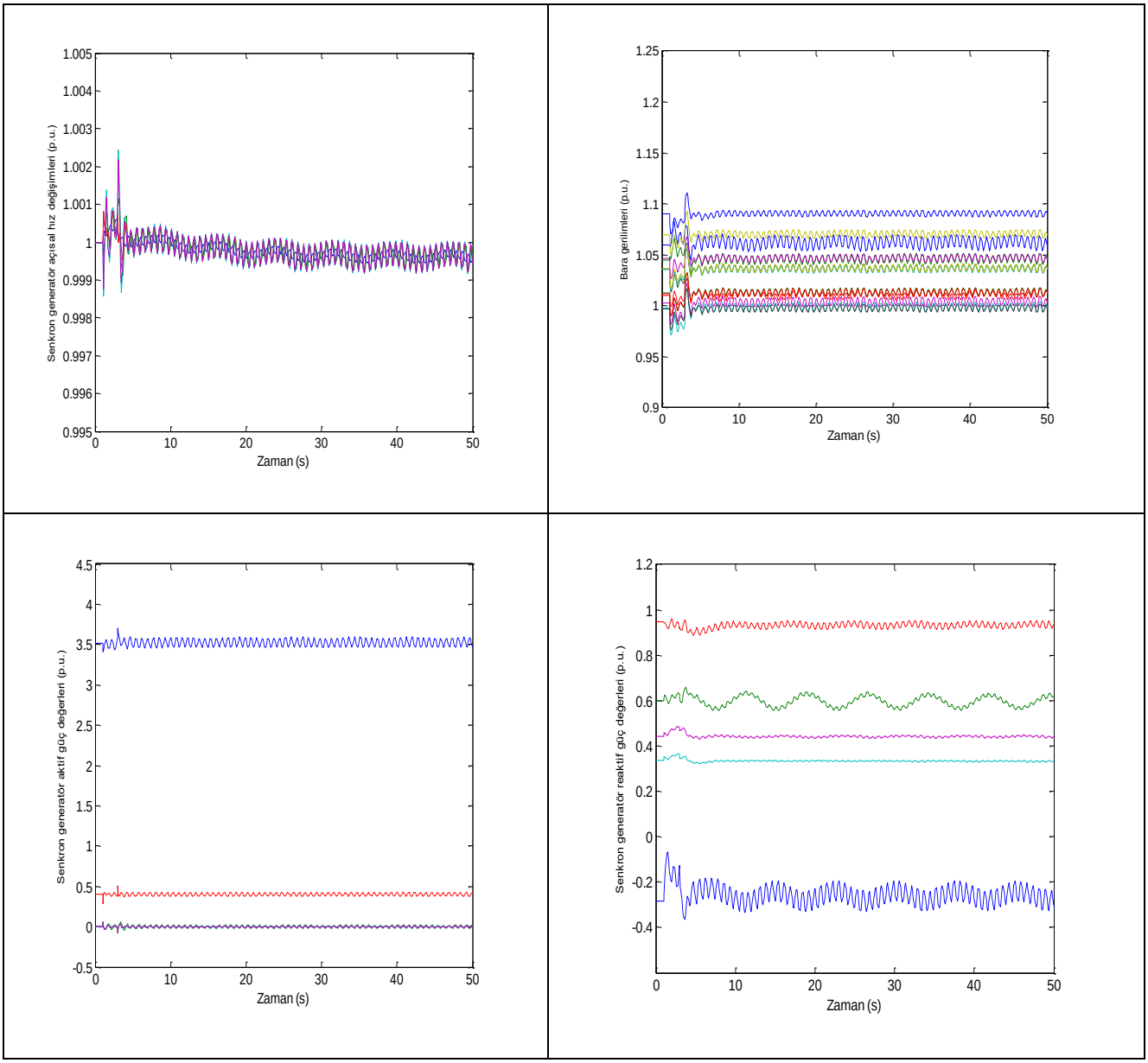
Test sistemi olarak belirlenen IEEE 14 baralı sistemde gerçekleştirilen benzetim çalışması için Güç Sistemleri Analizi Programı (PSAT) kullanılmıştır. Benzetim çalışması 3 senaryodan oluşmaktadır. GSKK modelleri 1, 2 ve 3 numaralı generatör baralarında kullanılmıştır. Otomatik Gerilim Regülatörü (OGR) 3 senaryo için de model 2 kullanılarak incelenmiştir. İlk senaryoda GSKK 1 modelinin kullanılması ile benzetim çalışması gerçekleştirilmiştir. GSKK 1 modelinin kullanılması ile elde edilen sonuçlar Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 2. IEEE 14 baralı güç sistemi



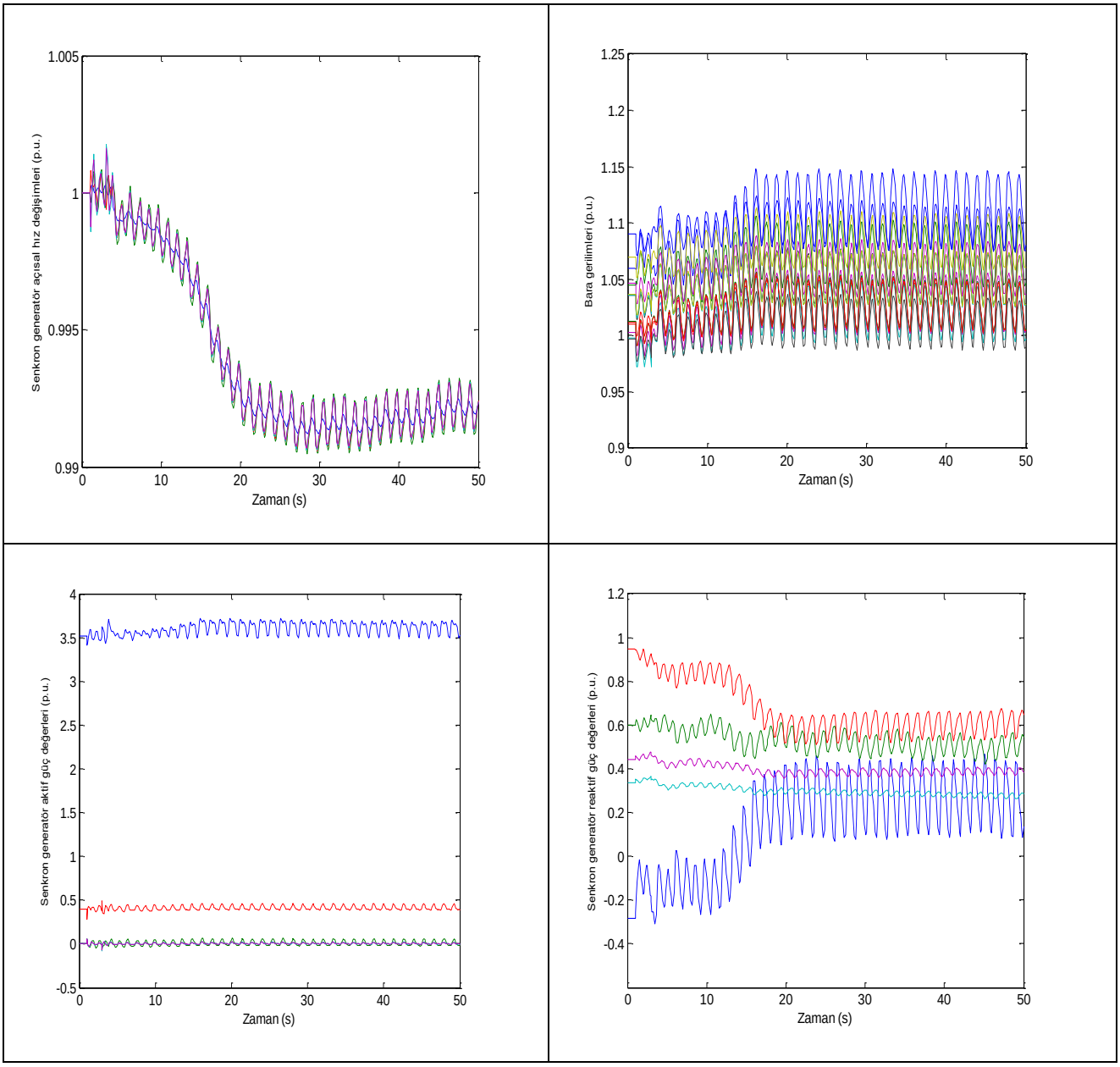
Şekil 3. GSKK model 1'in kullanılması ile elde edilen sonuçlar



Şekil 4. GSKK model 2'in kullanılması ile elde edilen sonuçlar

GSKK model 1'in kullanılması ile senkron generatör açısal hız değişimlerinin, bara gerilimlerinin, senkron generatörlerin aktif ve reaktif güç değişimlerinin detaylı olarak incelenmesiyle, sistem parametrelerinin kararsız olduğu görülmektedir. Dahası salınımların benzetim çalışması boyunca sönümlenmediği görülmektedir. Benzetim çalışmasında senaryo 2'de GSKK model 2 kullanılmıştır. GSKK 2 modeli 1, 2, ve 3. baralarda bulunan senkron generatörlere bağlanmıştır. GSKK 2 modelinin kullanılması ile elde edilen sonuçlar Şekil 4'te gösterilmiştir.

1, 2, ve 3 numaralı senkron generatörlerde kullanılan GSKK model 2 ile elde edilen sonuçlar neticesinde senkron generatörlerin açısal hız değişimlerinde, bara gerilimlerinde, senkron generatörlerin aktif ve reaktif güç değişimlerinde kararlılığın arttığı görülmektedir. Sistemde GSKK model 2'nin kullanılması ile salınımların belirli bir zaman içerisinde sönümlendiği görülürken, sistemin kısa zaman içerisinde kararlı hale gelmeye çalıştığı görülmektedir. Son senaryoda ise GSKK model 2'nin sistem üzerinde oluşturduğu etkiler üzerine yoğunlaşılmıştır. GSKK model 3'ün kullanılması ile benzetim çalışmasında elde edilen sonuçlar Şekil 5'te detaylı olarak sunulmuştur.



Şekil 5. GSKK model 3'ün kullanılması ile elde edilen sonuçlar

IEEE 14 baralı sistemde GSKK model 3'ün 1,2 ve 3 numaralı senkron generatörlerde kullanılması ile generatörlerin açısal hız değişimlerinin, bara gerilimlerinin ve generatörlerin aktif-reaktif güç değişimlerinin nispeten kararlı hale geldiği görülmektedir. Senkron generatör aktif güç parametresinde sistem kararlı hale gelirken, hız değişimleri, bara gerilimleri ve generatörlerin reaktif güç değişimlerinde ise sistemin kararsız olduğu görülmektedir.

5. Sonuçlar

IEEE 14 baralı güç sisteminde sekonder gerilim kontrolü için farklı GSKK modellerinin geçici kararlılık durumundaki etkileri detaylı olarak incelenmiştir. Sekonder gerilim kontrolünde kullanılan OGR modelinin yanı sıra GSKK modellerinin kullanılması ile senkron generatörlerin daha iyi zaman cevabı vermesi amaçlanmıştır. GSKK ve OGR modellerin birlikte kullanıldığı çalışmalarda geçici kararlılık durumlarında etkili olduğu referans [19] ve referans [21]'de gösterilmektedir. Sistemin kısa süre içerisinde kararlı hale gelmesinde uygun denetleyici seçiminin kararlılık süresi ve salınım üzerinde ne kadar etkili olduğu bu çalıma ile gösterilmiştir. GSKK model 1, GSKK model 2 ve GSKK model 3'ün OGR model 2 ile birlikte kullanılması ile senkron generatör açısal hız değişimleri, bara gerilimleri ve senkron generatör aktif-reaktif güç değişimleri üzerinde etkili olduğu görülmüştür. GSKK 2

modelinin sekonder gerilim kontrolü ile birlikte kullanılması ile en iyi sonuçların elde edildiği görülürken, GSKK 1 ve GSKK 3 modelinin OGR 2 model ile kullanılması ile daha kötü sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Bu çalışma ile farklı güç sistemlerinde GSKK ve OGR kullanımının yanı sıra Türbin Yöneticisi (TY) modelleri ile birlikte kullanılmasına imkan sağlanmaktadır. FACTS cihazları, rüzgar türbinleri ve enerji depolama sistemi elemanlarından batarya ile farklı güç sistemlerinin geçici kararlılık esnasında koordinasyonunun sağlanması ile beraber kullanılabileceğine zemin hazırlanmaktadır. Bunun yanısıra GSKK ve OGR modellerin sekonder gerilim kontrolünde etkin olarak kullanılabileceği küçük sinyal kararlılığı ile yapılacak olan çalışmalarda detaylı olarak ele alınabilmesine bir yol göstermektedir.

Kaynaklar

[1] da Silva, R. J. G., De Souza, A. Z., Leme, R. C., & Sonoda, D. (2013). Decentralized secondary voltage control using voltage drop compensator among power plants. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems,* 47, 61-68.

[2] Mehrjerdi, H., Lefebvre, S., Saad, M., & Asber, D. (2012). A decentralized control of partitioned power networks for voltage regulation and prevention against disturbance propagation. *IEEE Transactions on Power Systems*, 28(2), 1461-1469.

[3] Islam, S. R., Muttaqi, K. M., & Sutanto, D. (2014). A decentralized multiagent-based voltage control for catastrophic disturbances in a power system. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 51(2), 1201-1214.

[4] Flórez, J., Tapia, A., Criado, R., & Griajalba, J. M. (1994). Secondary voltage control based on a robust multivariable PI controller. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems,* 16(3), 167-173.

[5] Abdalla, O. H., Ghany, A. A., & Fayek, H. H. (2016, December). Coordinated PID secondary voltage control of a power system based on genetic algorithm. *In 2016 Eighteenth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON)* (pp. 214-219). IEEE.

[6] Lefebvre, H., Fragnier, D., Boussion, J. Y., Mallet, P., & Bulot, M. (2000, July). Secondary coordinated voltage control system: feedback of EDF. *In 2000 Power Engineering Society Summer Meeting (Cat. No. 00CH37134)* (Vol. 1, pp. 290-295). IEEE.

[7] Paserba, J. J. (2002, July). Secondary voltage-VAr controls applied to static compensators (STATCOMs) for fast voltage control and long term VAr management. *In IEEE Power Engineering Society Summer Meeting,* (Vol. 2, pp. 753-761). IEEE.

[8] Mehrjerdi, H., Lefebvre, S., & Saad, M. (2015). STATCOM application for decentralized secondary voltage control of transmission networks. *In Static Compensators (STATCOMs) in Power Systems* (pp. 531-556). Springer, Singapore.

[9] Nguyen T.T.,&Nguyen, V.L. (2005, June) Application of wide-area network of phasor measurements for secondary voltage control in power systems with FACTS controllers. In IEEE Power Engineering Society General Meeting,2005 (pp.2927-2934).IEEE

[10] Corsi, S., Pozzi, M., Sabelli, C., & Serrani, A. (2004). The coordinated automatic voltage control of the Italian transmission grid-part I: reasons of the choice and overview of the consolidated hierarchical system. IEEE Transactions on power systems, 19(4), 1723-1732.

[11] Döşoğlu M. K., Demirbaş M., Duman S., (2022) Güç Sistemlerinde Farkli OGR Modellerinin Sekonder Gerilim Kontrolü Üzerindeki Etkileri. *International Istanbul Congress of Multidisciplinary Scientific Research,* pp. 62-68. Proceedings Book ISBN: 978-625-7464-91-8.

Güç sistemlerinde farklı PSS modelleri ve UPFC-POD ile küçük sinyal kararlılığının incelenmesi. Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi, 14(1), 11-22.

[12] Hu B., Cañizares, C. A., & Liu, M. (2010, August). Secondary and Tertiary Voltage Regulation based on optimal power flows. In 2010 IREP Symposium Bulk Power System Dynamics and Control-VIII (IREP) (pp. 1-6). IEEE.

[13] Hernandez, B., Canizares, C. A., Ramirez, J. M., Hu, B., & Liu, M. (2018, June). Secondary and tertiary voltage regulation controls based on regional optimal power flows. In 2018 Power Systems Computation Conference (PSCC) (pp. 1-7). IEEE.

[14] El Moursi, M., Joos, G., & Abbey, C. (2008). A secondary voltage control strategy for transmission level interconnection of wind generation. IEEE Transactions on Power Electronics, 23(3), 1178-1190.

[15] El - Moursi, M. S. (2010). A novel line drop secondary voltage control algorithm for variable speed wind turbines. Wind Energy, 13(7), 633-655.

[16] Tapia, G., Tapia, A., & Ostolaza, J. X. (2007). Proportional–integral regulator-based approach to wind farm reactive power management for secondary voltage control. IEEE Transactions on Energy Conversion, 22(2), 488-498.

[17] Demirbaş M., Döşoğlu M. K. Güç sistemlerinde farklı PSS modelleri ve UPFC-POD ile küçük sinyal kararlılığının incelenmesi. Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi, 14(1), 11-22.

[18] Pillai, A. G., Thomas, P. C., Sreerenjini, K., Baby, S., Joseph, T., & Srecdharan, S. (2013, June). Transient stability analysis of wind integrated power systems with storage using central area controller. In 2013 Annual International Conference on Emerging Research Areas and 2013 International Conference on Microelectronics, Communications and Renewable Energy (pp. 1-5). IEEE.

[19] Essallah S., Buallegue A., Khedher A., "Integration of Automatic Voltage Regulator and Power System Stabilizer: Small-Signal Stability in DFIG-Based Wind Farms," J. Mod. Power Syst. Clean Energy, c. 7, sayı 5, ss. 1115–1128, 2019.

[20] Sorrentino E., Leon F., "Comparison Among Typical Input Signals of Different Types of Power System Stabilizers (PSS)," in 2020 IEEE ANDESCON, ss. 1–6, 2020.

[21] Ramos RA. Stability analysis of power systems considering AVR and PSS output limiters. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 31(4), 153-159, 2009.

Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi
International Journal of Technological Sciences
UTBD
IJTS

Araştırma Makalesi/Research Article

RFID tabanlı hayvan sayım sistemi

Ali Kavurur

Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Kontrol ve Otomasyon Bölümü, 15100, Burdur, Türkiye

Anahtar Kelimeler
RFID
Elektronik tanımlama
Hayvan izleme

Makale geçmişi:
Geliş Tarihi: 28.04.2023
Kabul Tarihi: 11.07.2023

Öz: Hayvancılık faaliyetlerinde hayvanların izlenmesi, gerekli bilgilerin kayıt altına alınıp verilerin değerlendirilmesi oldukça önemlidir. Bunun için kullanılan yöntemlerin bir tanesi de radyo frekanslı tanımlama teknoloji (RFID) dir. Bu çalışmanın amacı; Makü Hayvan çiftliğinde bulunan küçükbaş hayvanların çiftliğe giriş çıkışta sayılarını takip ederek hangi hayvanın girip çıktığını, toplam hayvan sayısını RFID sistemi ve yazılım kullanarak tespit edebilmektir. Çalışma bunun için çiftlikte bulunan hayvanların ayak veya kulak etiketleri kullanarak gerçekleştirilmiştir. RFID okuyucu olarak Agrident ASR-550 cihazı, i5 6500 işlemcili ve 8 Gb RAM'e sahip bir dizüstü bilgisayar ve C# program kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Cihaz aynı anda birden fazla veri okuduğundan, aynı hayvanın tekrar sayılmaması için programda gerekli düzenlemeler yapılmıştır. Sonuç olarak çiftlikte bulunan tüm hayvanların başarılı bir şekilde sayımı ve izlenmesi gerçekleştirilmiştir.

Atıf için/To Cite: Kavurur A. RFID Tabanlı Hayvan Sayım Sistemi. Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi, 15(2), 59-63, 2023.

RFID Based animal counting system

Keywords
RFID
Electronic identification
Animal tracking

Article history:
Received: 28.04.2023
Accepted: 11.07.2023

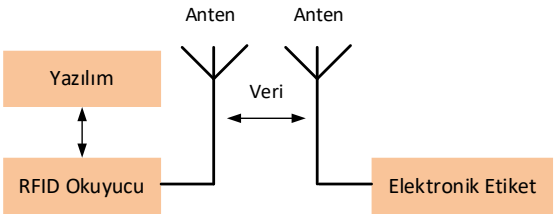
Abstract: It is very important to monitor animals in livestock activities, record the necessary information and evaluate the data. One of the methods used for this is radio frequency identification technology (RFID). The aim of this study; It is to find out which animal enters and leaves the farm by following the number of small cattle in and out of the farm, and the total number of animals by using RFID system and software. The study was carried out using foot or ear tags of farm animals. Counting was carried out via serial port using Agrident ASR-550 device and antenna as RFID reader, a laptop computer with i5 6500 processor and 8 Gb RAM, and C# program. Since the device reads more than one data at the same time, necessary adjustments were made in the program so that the same animal would not be counted again. As a result, all animals on the farm were successfully counted and monitored.

1. Giriş

Günümüzde hayvancılık işletmelerinde havyanların takip edilmesi ve bilgilerinin kayıt altına alınması işletme verimi açısından oldukça önem arz etmektedir. Bu amaçla bir çok yazılım ve donanım sistemlerinden faydalanılmaktadır. Gelişen teknoloji ile bu kullanım oranı her geçen gün artmaktadır. Havyan takibi için kullanılan GPS, GSM, Görüntü işleme gibi tekniklerin yanında RFID teknolojiside yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. RFID teknolojisinin kullanım kolaylığı, ucuzluğu ve gerekli durumlarda güncellenebilmesi açısından tercih edilmektedir. Devlet tarafından hayvanların kulaklarına etiket takılması zorunluğu bulunması nedeniyle RFID teknolojisi için gerekli olan altyapının bir kısmı zaten hazır bulunmaktadır. RFID, radyo dalgalarını kullanarak insanları veya nesneleri otomatik tanımlamak için kullanan teknolojiler için genel bir terimdir. RFID sistemi temelde; RFID etiket, RFID okuyucu ve verileri değerlendirecek olan yazılımdan oluşur. Okuyucu, taşınabilir veya sabit montajlı bir cihaz olabilir. Kullanılan radyo frekansına bağlı olarak okuyucudan radyo dalgaları yayılmaktadır. Anten tarafından üretilen elektromanyetik bölgede bir RFID etiketi bulunması durumunda okuyucu aktivasyon sinyalini algılayarak, etiketin entegre

* İlgili yazar/Corresponding author: kavurur@mehmetakif.edu.tr

devresinde kodlanan verileri çözerek işlenmek üzere bilgisayar sistemine aktarmaktadır. Tipik bir RFID sistemi, Şekil 1'de gösterilmektedir [1].



Şekil 1. RFID Sistemi

RFID etiketler enerji kullanımına göre 3 şekilde kategorize edilebilir. Aktif, Pasif ve Yarı Pasif.

Pasif etiketlerde yerleşik güç kaynakları bulunmadığından, gerekli güç için okuyucunun yaydığı elektromanyetik dalgaya bağımlıdırlar. Okuyucudan gelen dalga gerilim indüklemesiyle etiketin çipini aktif hale getirir ve bu bilgiyi anten vasıtasıyla okuyucuya gönderir. Pasif etiketler frekansa bağlı olarak 10 metreye kadar okuma mesafesine sahiptirler. Veri iletim hızı da çalışma frekansına bağlıdır. Düşük maliyetli olmaları, uzun çalışma ömürleri, küçük boyutlu ve hafif olmaları avantajlarıdır.

Yarı pasif etiketlerde, yalnızca çipi elektriksel olarak beslemek için pille çalışır. Etiketler elektromanyetik dalga emisyonu için hala okuyucuya bağımlıdır. Pil çoğu zaman devre dışı kalır ve böylece etiketlerin kullanım ömrü uzar. Yarı pasif etiketlerde sağlanan güç kaynağı, pasif etiketlere göre çalışma mesafesinin aralığını artırır.

Aktif etiketlerde, çipe güç sağlamak ve aktif bir verici aracılığıyla dalga yaymak için bir pili le gömülüdür. Okuma aralığı pasif olanlardan daha geniş, veri aktarım hızı daha fazladır ve aynı anda birden fazla okuma yazma yapabilmektedir. Dezavantajları ise yüksek maliyetleri ve yüksek boyutlarıdır. Çalışma ömrü pil ömrüne bağlıdır [2].

RFID etiketler kullanılan frekansa göre de sınıflandırılabilir.

125–134 kHz: Bu frekans, hayvan tanımlaması için kullanılan, RFID etiketlerinin 0,5 m'den daha az bir aralıkta algılanmasına izin veren düşük frekanstır. Bu frekansta veri aktarım hızı saniyede 1 kbit'ten azdır.

13,56 MHz: Bu frekans, RFID etiketlerinin 1,5 m mesafeye kadar algılanmasını sağlar. Bu belirli frekans için veri aktarım hızı saniyede yaklaşık 25 kbit'tir. Bu frekans, erişim ve güvenlikle ilgili uygulamalar için kullanılır

433–956 MHz: Bu aralığa ait frekanslar, ultra yüksek frekanslar olarak nitelendirilir. 433 ila 864 aralığındaki frekanslar, RFID etiketlerinin 100 m'ye kadar algılanmasına izin verirken, 865 ila 956 MHz aralığındaki frekanslar, RFID etiketlerinin 0,5 ila 5 m arasında değişen bir mesafede algılanmasına izin verir. 433 ve 956 MHz aralığındaki tüm frekanslar için veri aktarım hızı saniyede 100 kbit'tir. Bu aralıktaki frekanslar lojistikteki uygulamalar için kullanılır [3].

2,45 GHz: Bu frekans, bir RFID okuyucunun bir etiketi on metre mesafeden algılamasını sağlar. Bu özel frekans, mikrodalga frekansı olarak tanımlanır. Bu belirli frekans için veri aktarım hızı saniyede 100 kbit'e kadardır. Belirtilen frekans, mobil araç geçiş ile ilgili uygulamalar için kullanılmaktadır [4].

Aşağıdaki Tablo 1 ve Tablo 2'de RFID kullanımına ve frekanslarına göre ISO standartları verilmiştir. Hayvanlarda RFID teknolojisinin kullanımına ilişkin standardizasyona ilişkin olarak, geçerli olan iki uluslararası standart vardır: ISO (Uluslararası Standartlar Organizasyonu)11784 ve ISO 11785 ve ISO 11784, Kod Yapısını, ISO 11785 ise Teknik Konsepti ifade eder. Etiketler farklı frekanslarda çalışabilmektedir [5].

Tablo 1. RFID kullanımına göre ISO Standartları

Hayvan Tanımlama	ISO 11784, ISO 11785, ISO 14223
Nesne Tanımlama	ISO/IEC 14443, ISO/IEC 15961, ISO/IEC 15962, ISO/IEC 15693, ISO/IEC 18000
Gerçek Zamanlı lokasyon Sistemleri	ISO/IEC 24730
Nakliye Sistemleri	ISO 18185, ISO 23389

Tablo 2. RFID frekanslarına göre ISO Standartları

	Düşük Frekans 125-134.2 kHz	Yüksek Frekans 13.56 MHz	Yüksek Frekans 433 MHz	Ultra Yüksek Frekans 860-915 MHz	Ultra Yüksek Frekans 2.4 GHz
ISO	ISO 11784 ISO/IEC18000-2A ISO/IEC18000-2B	ISO/IEC14443 ISO/IEC15693 ISO/IEC18000-3	ISO 18000/7	ISO 18000/6A ISO 18000/6B ISO 18000/6C	ISO 18000/4 ISO/IEC24730-2
EPC Global		Class1		Class0 Class1	

ISO standardına göre, hayvan tanımlaması için taşıyıcı frekansı 134,2 kHz'dir. Etiket ile okuyucu arasında iletişim kurmak için kullanılan protokolde, RFID etiketi ile okuyucu arasındaki iletişim için kullanılan bit akışıyla ilgili olarak bit akışının doğru alınmasını sağlayan bir kodla birlikte bir tanımlama kodu bulunmaktadır. Bu tanımlama kodu ISO 11784'te verilmiştir. Diğer taraftan, iletilen bilgilerin kullanımı ve işlenmesi (transponderin etkinleştirilmesi, bilgi aktarımı, kullanılan protokoller) ISO 11785'te açıklanmıştır. Bu iki standardın kombinasyonu, RFID teknolojisinin kullanımını kapsar. ISO 11785'e göre, tam çift yönlü (full duplex) ve yarı çift yönlü (half duplex) olmak üzere temelde 2 tür tip tanımlanmıştır: 64 bit tanımlama biti içinde, dünya çapında benzersiz bir hayvanı tanımlayabilen bir kod saklanmaktadır. Hayvanların kimliklendirilmesi, her bir hayvana ilişkin spesifik bilgilerin izini sürebilmek için yapılır. Birisi bilinmeyen bir hayvan bulursa, etiket üzerinden tanımlama kodu, hayvanın mevcut sahibi, hayvanın geçmişi, hayvanın hareketlerinin izlenmesi vb. gibi belirli ayrıntıların elde edilmesini mümkün kılmaktadır. Kod ne kadar fazla alan içerirse, hayvan hakkında o kadar fazla bilgi doğrudan kullanılabilir ve bilgiyi almak o kadar kolay olur [6].

Tam çift yönlü (FDX) tip iki yönlü bir sistem olup okuyucu tarafından transpondere enerji verilirken etiket kodunu okuyucuya geri gönderir. Yarı çift yönlü (HDX) tipte, transponderin aktivasyon alanından aldığı enerjiyi depolamak için bir araca sahip olması bakımından farklıdır. Okuyucu aktivasyon alanını oluşturmayı durdurduğunda etiket kodunu iletmeye başlar. Bu sistemde zamanın belli bir noktasında sadece tek yönlü radyo trafiği bulunmaktadır.

ISO standardı, hem FDX hem de HDX tipteki etiketleri RFID sisteminde okuyabilir. Aktivasyon sinyalleri aynı olabilirken cevaplar zaman içinde ayrılır. Aktivasyon, 134,2 kHz frekanslı bir elektromanyetik alanla yapılır. Transponderin anten bobini aktivasyon alanından enerji alır. Bu enerji, transponderdeki elektroniği çalıştırmak için kullanılır. FDX transponderleri saklanan kodu hemen iletmeye başlar. HDX transponderleri enerjiyi bir kapasitörde depolar ve aktivasyon alanının azalmasını bekler. Alanda bir düşüş algılanır algılanmaz, HDX transponder, kodunu iletmek için kapasitörde depolanan enerjiyi kullanır [7].

Hayvan etiketlemede yaygın olarak elektronik üç tür ISO uyumlu etiket bulunmaktadır. Bunlar; Elektronik ruminal bolus, Elektronik kulak-ayak etiketi ve Enjekte edilebilir etiketlerdir.

Elektronik ruminal bolus

Ruminal bolus, geviş getiren hayvanların retikulumunda veya ikinci midesinde tutulan seramik bir kapsüldür. Bilgileri bir okuyucuya otomatik olarak iletebilen bir radyo frekansı aktarıcısı içerir. Seramik, yekpare ve çelik ağırlıklı boluslar gibi farklı ruminal bolus türleri mevcuttur. Seramik boluslar genellikle silindiriktir. Elektronik aktarıcıyı çevreleyen seramik malzeme toksik değildir. Bolus tipi etiketler, aside dayanıklı bir malzeme ile paketlenmiş ve kayıp ve yer değiştirmeye karşı güvenilir etiketler olduğu bildirilmiştir. Bolus tipi etiketler hayvanın bolus aparatı ile hayvanlara ağızdan verilir. Yaygın olarak kullanılmasının bir başka nedeni de boluslara yerleştirilen sensörler ile hayvan hastalığının ve takibinin yapılabilmesidir [8].

Elektronik kulak-ayak etiketi

Poliüretandan yapılan kulak etiketine yerleştirilmiş plastik kaplı etiketlerdir. Harici olarak takılan bu etiketlerin suya ve diğer hava şartlarına dayanıklı olması gerekir. Hayvan kesiminden sonra kolayca çıkarılabilir. Dikkat edilmesi gereken konu, elektronik parçaların mutlaka suya karşı dayanıklı olmasıdır. Ayak numaraları (ayak bantları) süt tipi keçi sürülerinde bireysel olarak bir farkındalık oluşturmak ya da sürü yönetimi uygulamalarındaki aksaklıkları daha kolay belirlemek amacıyla uygulanmaktadır. Keçilerin her iki ayağına hem plastik hem de elektronik ayak numaralarının takılması da mümkündür.

Enjekte edilebilir etiket

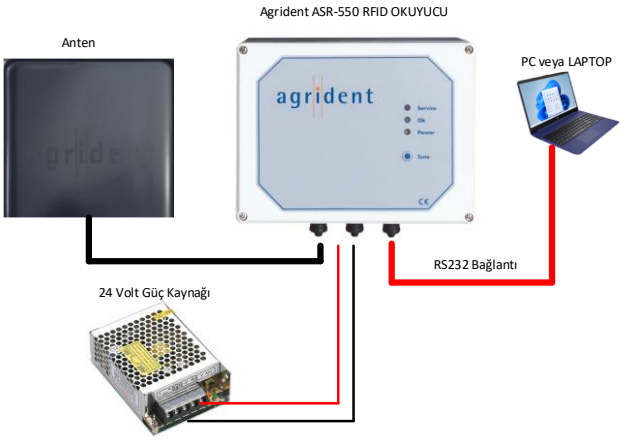
Bir iğne vasıtasıyla deri altına yerleştirilen enjekte etiketler sudan etkilenmezler ve okuma oranları yüksektir. Etiketler, hayvan için toksik olmayan bir biyomedikal cam kapsül ile kaplıdır. Tercih edilen yerler alın, dış kulak memesi, arka kulak kepçesi tabanı ve intraperitoneal boşluktur. Enjekte edilecek en uygun enjeksiyon yerleri olarak ilk olarak koltuk altının ve ikinci olarak kulak tabanının uygun olduğunu bilinmektedir [9].

2. Materyal ve Metod

Yapılan çalışma Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesinde bulunan hayvan çiftliğindeki keçilerin çiftliğe giriş ve çıkışlarında elektronik ortamda sayımını gerçekleştirmiştir.

RFID okuyucu olarak Agrident firmasına ait ASR-550 cihazı kullanılmıştır. Cihaz 134,2 kHZ frekansını kullanmaktadır. HDX ve FDX uyumludur. (ISO 11784/5). 50x60 cm boyutlarındaki anten ile HDX 90 cm, FDX-B 80 cm'e kadar okuma yapabilmektedir. RS232 ve RS485

arabirimine sahiptir. Yapılan çalışmada RS232 birimi kullanılmıştır. Cihaz 12-24 volt aralığında çalışmaktadır. Aşağıdaki Şekil 2'de cihazın bağlantıları gösterilmiştir.



Şekil 2. RFID Sistemi bağlantıları

3. Uygulama

Sürü sayım programında Microsoft Visual Studio Express yazılımı ve verilerin kaydedilip saklanmasında yine Microsoft firmasının SQL Express yazılımı kullanılmıştır. Program son halini aldıktan sonra setup haline çevrilmiştir.

Şekil 3. Programın Çalışma Ekranı

Programın çalışması esnasında RFID sürekli okuma yapmakta ve kapıdan geçen hayvanın ayak veya kulağındaki RFID etiket kodunu okumaktadır. Aynı anda birden fazla okuma yaptığından, programla o hayvana ait tek bir ID yi kaydedip saklaması sağlanmıştır. Böylece yanlış sayım yapılmasının önüne geçilmiştir. Sayım işlemi tamamlandıktan sonra geçen hayvanların ID'si SQL programı kullanılarak veritabanına kaydedilmekte ve hangi hayvanların çiftlikten giriş çıkış yaptıkları belirlenebilmektedir. Programda C# için seri port prosedürleri kullanılmıştır.

Şekil 4. Programın denenme çalışmalarından bir kesit

4. Sonuçlar ve Öneriler

Sonuç olarak yapılan çalışmada, ayak veya kulak etiketi bulunan keçilerin RFID vasıtasıyla sayımı gerçekleştirilmiş, etiket okunurken oluşabilecek olumsuzluklar giderilmiştir. RFID okuyucunun aynı anda fazla sayıda okuma yapması dolayısıyla, programda tek bir RFID etiket değerini alması sağlanmıştır. Antenin uygun bir pozisyonda yerleştirilmesi ile tüm etiketler hatasız bir şekilde okunmuştur.

Voulodimos ve ark. (2010) RFID teknolojisi ile çiftlik yönetimi sistemi geliştirmişlerdir [10]. Çiftlik yönetim sistemi için gerekli veriler olarak hayvan sayısı, beslenme, sağlık geçmişi, süt üretimi gibi bilgiler kayıt altına alınmaya çalışılmıştır. Yapmış olduğum çalışma ile hayvan sayısının elde edilmesi için bir RFID tabanlı yazılım gerçekleştirilmiştir.

Ariff ve ark. (2014) Radyo Frekanslı Tanımlama (RFID) teknolojisinin hayvan sağlığı yönetimi programı geliştirmişlerdir [11]. Bu program sayesinde hızlı ve verimli bir sistem oluşturmuşlardır. Ancak yapmış oldukları yapmış çalışmada RFID frekans seçimi ve çiftliklerdeki hayvan sayısı gibi bazı önemli koşulların belirlenmesinin gerekli olduğu vurgusunu yapmışlaradır. Bu öneriden yola çıkılarak yapılan bu çalışmada ise hayvan sayısının doğru ve hızlı bir şekilde elde edilmesi gerçekleştrilmiştir.

İleride yapılacak olan çalışmalarda sayım ve izleme kısmı genel bir program içerisine modül olarak eklenerek genel çiftlik programı içerisinde yer alması sağlanabilir. Çiftliklerde bu sayım sistemi ile beraber hayvan ağırlığı tartımının RFID ile sisteme otomatik yüklenmesi, GSM, GPS takip sistemleri de kullanılarak hayvan izleme geliştirlebilir. Rumen bolus veya enjekte edilen etiketler kullanarak sistem veriminde farklı yaklaşımlar görülebilir. Uzak mesafe RFID okuyucularla sistem denenebilir. Program için Web tabanlı veya Mobil tabanlı uygulamalar geliştirilebilir.

Teşekkür

Bu çalışma Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Koordinatörlüğü 2017K12-41003-2 numaralı proje ile desteklenmiştir.

Kaynaklar

[1] Roberts CM. Radio frequency identification (RFID). *Computers & security,* 25(1), 18-26, 2006.

[2] Bibi F, Guillaume C, Gontard N, Sorli B. A review: RFID technology having sensing aptitudes for food industry and their contribution to tracking and monitoring of food products. *Trends in Food Science & Technology,* 62, 91-103, 2017.

[3] Ward M, Van Kranenburg R, Backhouse G. RFID: Frequency, standards, adoption and innovation. *JISC Technology and standards Watch,* 5, 2006.

[4] Landt J. The history of RFID. *IEEE potentials*, 24(4), 8-11, 2005.

[5] Ruiz-Garcia L, Lunadei L. The role of RFID in agriculture: Applications, limitations and challenges. *Computers and electronics in agriculture,* 79(1), 42-50, 2011.

[6] Kampers FWH, Rossing W, Eradus WJ. The ISO standard for radiofrequency identification of animals. *Computers and electronics in agriculture,* 24(1-2), 27-43, 1999.

[7] Ntafis V, Patrikakis CZ, Fragkiadaki EG, Xylouri-Fragkiadaki EM. *RFID Application in animal monitoring.* In The Internet of Things, pp. 165-184, Auerbach Publications, New York, 2008.

[8] Doğan, H., Çağlar, M.F., Yavuz, M., Gözel, M.A. (2016). Hayvan İzlemede Radyo Frekanslı Tanımlama Sistemlerinin Kullanımı. *Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi,* 8(2), 38-53.

[9] Taşkın, T., Akbaş, Y., Koyuncu, M., Kandemir, Ç., Tekin, A.B., Koşum, N. (2016). Küçükbaş Hayvan Yetiştiriciliğinde Elektronik Tanımlama Sistemlerinin Önemi ve Kullanımı Olanakları. *Hayvansal Üretim,* 57(2), 42-56.

[10] Voulodimos, A.S., Patrikakis, C.Z., Sideridis, A.B., Ntafis, V.A., Xylouri, E.M. (2010). A complete farm management system based on animal identification using RFID technology. *Computers and electronics in agriculture,* 70(2): 380-388; DOI 10.1016/j.compag.2009.07.009

[11] Ariff, M.H., Ismarani, I., Shamsuddin, N. (2014). RFID based systematic livestock health management system. *In 2014 IEEE Conference on Systems, Process and Control (ICSPC 2014, December)* Book of Proceedings, 111-116.

Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi, 15(2), 64-72, 2023 DOI: 10.55974/utbd.1311229

Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi
International Journal of Technological Sciences
UTBD
IJTS

Araştırma Makalesi/Research Article

Otonom mobil robotların güvenli veri iletimi için hibrit şifreleme yaklaşımı

Mustafa Emre Erbil[1], Ahmet Ali Süzen[2], Hilmi Cenk Bayrakçı[*1]

[1]Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, 32000, Isparta, Türkiye
[2]Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, 32000, Isparta, Türkiye

Anahtar Kelimeler
Mobil otonom robotlar
Hibrit şifreleme
Veri güvenliği

Makale geçmişi:
Geliş Tarihi: 07.07.2023
Kabul Tarihi: 21.08.2023

Öz: Günümüzde teknolojik gelişmelerin sürekli ilerlemesiyle birlikte otonom ve yarı otonom araçlar; kişisel ve ticari taşımacılık, tarım, inşaat ve madencilik, araştırma ve keşif gibi birçok alanda süreçleri kolaylaştırmaktadır. Bu araçlar arasında fabrikalarda sıklıkla tercih edilen otonom mobil robotlar (Autonomous Mobile Robots, AMR) bulunmaktadır. AMR'lerin tercih edilmesinin sebepleri arasında birincisi, kullanıldığı alanlarda insan gücünün yetersiz olduğu durumlardır. İkinci olarak, bu robotlar, çalışanların sağlığını tehdit edebilecek riskli durumları ortadan kaldırabilir. Ayrıca, AMR'ler insan gücünden tasarruf sağlama potansiyeli de taşımaktadır. Bu çalışmada, kablosuz haberleşme teknolojileri kullanan AMR'lerin veri güvenliğinin hibrit bir şifreleme yöntemi kullanılarak sağlanması amaçlanmıştır. Asimetrik şifreleme yönteminin güvenlik performansı ve simetrik şifreleme yönteminin hızlı iletişim üstünlükleri, AMR'ler için her iki şifreleme yönteminin birlikte kullanılmasını zorunlu kılmıştır. Hibrit şifreleme yaklaşımında temel olarak asimetrik şifreleme yöntemi Elliptic Curve Cryptography (ECC) ile simetrik şifreleme yöntemi Advanced Encryption Standard (AES) birlikte kullanılmıştır. ECC şifreleme yönteminin temelinde oluşturulan dijital imzalama yöntemi olan ECDSA (Elliptic Curve Digital Signature Algorithm) referans alınarak kullanılmıştır. AES şifreleme yönteminde ise şifrelemenin yanında doğrulama da yapıldığı için GCM (Galois/Counter Mode) tercih edilmiştir. Bu çalışmada birbirleriyle veya kontrolcü sistemle haberleşen ve veri aktarım görevini üstlenen AMR'ler, Python programlama dili aracılığıyla ECDSA-AES/GCM hibrit şifreleme yöntemi kullanılarak şifrelenmiş ve performansı değerlendirilmiştir. Bu sayede kablosuz iletişim sırasında olası bir veri sızıntısı durumunda iletilen verinin, gizliliğinin ve bütünlüğünün korunması incelenecektir. Sonuç olarak önerilen bu yöntem ile kablosuz haberleşme teknolojileri kullanan otonom mobil robotlar için veri güvenliği açısından önemli bir adım sağlaması hedeflenmektedir.

Atıf için/To Cite: Erbil M.E. Süzen A.A. Bayrakçı H.C. Otonom mobil robotların (AMR) veri güvenliğinin hibrit şifrelem . Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi, 15(2), 64-72, 2023.

A Hybrid encryption approach for secure data transmission of autonomous mobile robots

Keywords
Mobile autonomous robots
Hybrid encryption
Data security

Article history:
Received: 07.07.2023
Accepted: 21.08.2023

Abstract: Today, with the continuous advancement of technological developments, autonomous and semi-autonomous vehicles facilitate our operations in many areas such as personal and commercial transportation, agriculture, construction and mining, research and exploration. Among these vehicles are autonomous mobile robots (AMRs), which are frequently preferred in factories. One of the reasons why AMRs are preferred is that there is insufficient manpower in the areas where they are used. Secondly, these robots can eliminate risky situations that can threaten the health of workers. In addition, AMRs have the potential to save manpower. In this study, we aim to provide data security for AMRs using wireless communication technologies by using a hybrid encryption method. The security performance of asymmetric encryption and the fast communication advantages of symmetric encryption make it necessary to use both encryption methods together for AMRs. In the hybrid encryption approach, the asymmetric encryption method ECC

* İlgili yazar/Corresponding author: ahmetsuzen@isparta.edu.tr

(Elliptic Curve Cryptography) and the symmetric encryption method AES (Advanced Encryption Standard) are used together. ECDSA (Elliptic Curve Digital Signature Algorithm), the digital signature method based on the ECC encryption method, was used as a reference. In the AES encryption method, GCM (Galois/Counter Mode) is preferred since verification is performed in addition to encryption. In this study, AMRs, which communicate with each other or with the controller system and act as data senders, were encrypted using ECDSA-AES/GCM hybrid encryption method using Python programming language and their performance was evaluated. In this way, the protection of the confidentiality and integrity of the transmitted data in case of a possible data leakage during wireless communication will be examined. As a result, this proposed method aims to provide an important step in terms of data security for autonomous mobile robots using wireless communication.

1. Giriş

Teknolojik gelişmelerin sürekli ilerlemesiyle birlikte otonom ve yarı otonom araçlar birçok alanda önemli bir rol oynamaktadır. Bu araçlar insan müdahalesine gerek kalmadan görevleri yerine getirebilen ve çevresel bilgileri toplayabilen akıllı sistemlerdir [1]. AMR, endüstriyel tesislerde yaygın olan karmaşık ya da basit işlemleri gerçekleştirmek için bir konumdan diğerine hareket edebilen robotlardır [2]. Hem iç hem de dış mekân güvenlik işlerinde, tehlikeli işlerde veya tekrarlayan süreçlerde yaygın olarak kullanılabilmektedir [3]. Çoğunlukla fabrikalarda kullanılan ve askeri alanda, hastane operasyonlarında, tarımda da kullanıldığı görülen AMR'ler, otomatik malzeme taşıma, depolama ve paketleme gibi görevleri gerçekleştirerek operasyonel verimliliği artırırken insan gücünden tasarruf sağlamaktadır [4]. Bununla birlikte, AMR'lerin kablosuz haberleşme yetenekleri, veri güvenliği konusunda bazı zorlukları beraberinde getirmektedir.

Kablosuz iletişim, yetkisiz erişimlerden kaynaklanan veri sızıntılarına karşı hassas endüstriyel verilerin korunmasını gerektirmektedir. Bu nedenle, AMR'lerin kablosuz haberleşmelerinin güvenliği büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmanın amacı, kablosuz haberleşme kullanan AMR'lerin veri güvenliğini sağlamak için bir hibrit şifreleme yöntemi kullanmasını sağlamaktır. Hibrit şifreleme, asimetrik ve simetrik şifreleme yöntemlerinin birleşimi olarak hem güvenlik hem de iletişim hızı açısından avantajlar sağlamaktadır. Asimetrik şifreleme yöntemi, güçlü güvenlik sağlama yeteneğine sahip olsa da işlemci yoğunluğu ve hesaplama süresi açısından yavaş olabilmektedir. Simetrik şifreleme yöntemi ise hızlı iletişimi sağlarken anahtar paylaşımı ve yönetimi gibi zorluklarla karşılaşabilmektedir. Hibrit şifreleme yaklaşımı, ECC ve AES yöntemlerinin birlikte kullanılmasıyla veri güvenliğini optimize etmektedir. AES, farklı bitlerde şifreleme imkanı sunan ve donanım hızlandırma yetenekleri ile veri gizliliği için hızlı şifreleme yapan bir algoritmadadır [17]. ECC, eliptik bir eğri üzerinde tanımlanan aritmetik işlemleri eğri türü ve anahtar uzunluğuna bağlı olarak şifreleyen güçlü bir asimetrik algoritmadır[14].

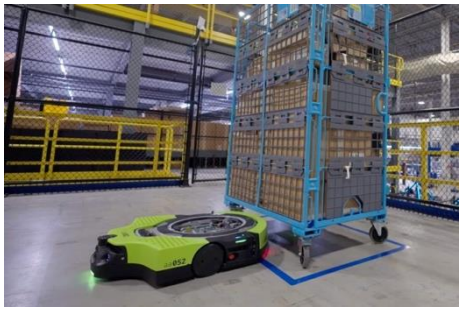
Bu çalışmada, birbirleri arası iletişim sağlayabilen ve kontrolcü sistemle haberleşebilen AMR'lerin verileri, Python programlama dilindeki PyCryptodome, ecdsa, hashlib kütüphaneleri aracılığıyla ECCDSA-AES/GCM hibrit şifreleme yöntemi kullanılarak şifrelenecektir. Bu yaklaşım, kablosuz iletişim sırasında olası veri sızıntısı durumunda, iletilen verinin gizliliğinin ve bütünlüğünün korunmasını amaçlamaktadır. Elde edilecek sonuçlar, kablosuz haberleşme teknolojileri kullanan otonom mobil robotlar için veri güvenliği açısından önemli bir adım sağlamış olacaktır.

2. Otonom Mobil Robotlar (AMR's)

AMR'ler önceden verilmiş komut olmaksızın dolaşmak ve görevleri tamamlamak için sensörler ve makineler kullanmaktadır. AMR'ler, ortamları yorumlamak ve gezinmek için gelişmiş bir sensör seti, yapay zekâ ve makine öğrenimi kullanır [5]. Çevrelerini anlayabilir ve bağımsız hareket edebilirler, bu da onları çeşitli endüstriler ve uygulamalar için önemli hale getirir. AMR'ler, üretim ve dağıtım tesisleri dahil olmak üzere çeşitli endüstrilerde ve uygulamalarda kullanılır [6]. Konveyör sistemleri gibi farklı şekil ve büyüklükteki malzemeleri bir noktadan başka bir noktaya taşıyabilirler. Ayrıca sağlık, konaklama, perakende sektörleri ve diğer birçok alanda teslimat, temizlik, envanter yönetimi gibi görevleri yerine getirmek için de kullanılırlar. AMR'lerin çok yönlülüğü ve uyarlanabilirliği, operasyonel verimlilik ve üretkenlik artışı sağlamada değerli bir araç haline gelmelerini sağlamıştır [7]. AMR'ler, artan verimlilik, üretkenlik ve güvenlik gibi çeşitli avantajlar sunar. Tekrarlayan, tehlikeli veya yüksek hassasiyet gerektiren görevleri yerine getirerek çalışanların daha karmaşık görevlere odaklanmalarını sağlarlar. Ayrıca, çalışanları riske atmadan tehlikeli ortamlarda çalışabilmesi, işyeri yaralanmaları ve kazaları riskini azaltmaktadır. AMR'ler için hareket kontrolörleri, otonom bir makine oluşturmak için gereken dayanıklılığı ve verimliliği sağlar [8]. AMR'lerde kullanılan ileri teknoloji, uygun maliyetli ve verimli bir çözüm sunarak çeşitli endüstriler ve

uygulamalar için değerli bir katkı sağlayarak çeşitli görevleri yerine getirir. AMR'ler, otomasyonun sağladığı hassasiyet ve doğrulukla iş hatalarını azaltır ve ürün kalitesini artırır. Ek olarak, AMR'ler endüstriyel sektörlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Sağlık sektöründen, perakende sektörüne, envanter yönetiminden, tehlikeli malzemelerin taşınmasına kadar çeşitli alanlarda fayda sağlarlar. İmalat sektöründe, AMR'ler genellikle malzeme taşıma, üretim, paketleme ve envanter takibi gibi görevlerde kullanılır. Perakende sektöründe, AMR'ler genellikle depolama, toplama ve paketleme görevlerinde kullanılır. Sağlık sektöründe (Şekil 1a), AMR'ler genellikle ilaç dağıtımı, hastane envanter yönetimi ve bazen hasta bakımı gibi görevlerde kullanılır. Tüm bu uygulamalar, AMR'lerin endüstriyel sektörlerdeki çeşitliliğini ve esnekliğini gösterir (Şekil 1b).

Şekil 1. (a) Hastanelerde kullanılan, hastalara ilaç, yiyecek gibi önemli ihtiyaçları taşımak için kullanılan AMR



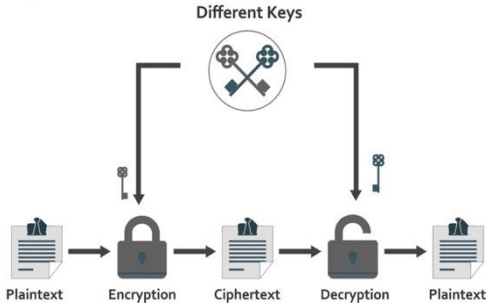
Şekil 1. (b) Koli, paket taşımacılığı yapmak için kullanılan AMR

3. Şifreleme Yöntemleri

Şifreleme, bilgiyi koruma ve veri güvenliğini sağlama süreci olup, bilginin erişilemez veya anlaşılmaz hale getirilmesi anlamına gelir. Şifreleme işlemi, bir anahtar veya bir dizi anahtar kullanarak bir mesajı veya bilgiyi okunabilir bir format (plaintext) 'den okunamaz bir formata (ciphertext) dönüştürür [11]. Şifreleme teknikleri, bilgi güvenliği ve veri gizliliği açısından son derece önemlidir. Şifreleme yöntemleri, genel olarak, asimetrik ve simetrik şifreleme olarak iki ayrı başlık altında toplanır.

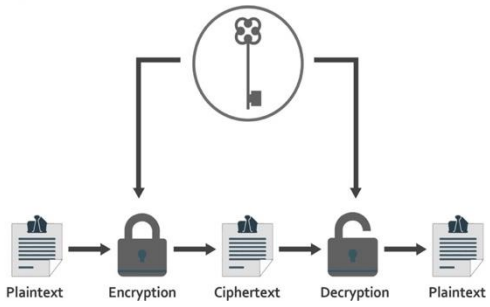
2.1. Asimetrik ve simetrik şifreleme

Asimetrik ve simetrik şifreleme dijital dünyada bilgi ve verileri korumak için kullanılan iki ana yöntemdir. Asimetrik şifreleme, genellikle "public key" (açık anahtar) şifrelemesi olarak bilinir ve iki anahtar (bir özel, bir açık) kullanılır (Şekil 2). Bilgiyi şifrelemek için açık anahtar kullanılır ve şifreli bilgiyi çözmek için özel anahtar kullanılır. Özel anahtar sadece bilgiyi çözecek olan taraf tarafından bilinir. Bu yöntem bilgilerin güvenli bir şekilde aktarılmasını sağlamakla beraber bu işlemler için daha fazla işlem gücü gerektirir. Bu yöntem, birçok modern güvenlik protokolü ve uygulaması tarafından kullanılır ve bilgiyi güvenli bir şekilde aktarma yeteneği nedeniyle popülerdir [12].



Şekil 2. Asimetrik şifreleme şeması

Aynı anahtarın hem şifreleme hem de şifre çözme işlemleri için kullanıldığı yöntem ise Simetrik Şifreleme yöntemidir (Şekil 3). Bu yöntem, asimetrik şifrelemeye göre daha hızlıdır, ancak anahtarın güvenli bir şekilde aktarılması gerekliliği nedeniyle riskler taşır. Simetrik şifrelemenin hızlı doğası, büyük miktarda verinin hızlı bir şekilde şifrelenmesi gereken durumlar için idealdir [13].



Şekil 3. Simetrik şifreleme şeması

2.2. Eliptik Eğri Şifreleme (ECC)

ECC dijital imzalar ve anahtar değişim protokolleri gibi uygulamaları hedefleyen asimetrik şifreleme metodolojilerinin bir türüdür. ECC, eliptik bir eğri üzerinde tanımlanan aritmetik işlemleri temel alır. ECC'nin kullandığı eliptik eğri Denklem 1 ile ifade edilebilir [14].

$$y^2 = x^3 + ax + b \pmod p \quad (1)$$

Burada a ve b, belirli parametreleri, p ise bir asal sayıyı belirtir. ECC'nin temel prensibi, bir özel anahtar (private key) ve onunla ilişkili bir genel anahtar (public key) oluşturmaktır. ECC'nin etkili özelliklerinden biri daha düşük anahtar uzunluklarına rağmen en az asimetrik şifreleme yöntemleri kadar güvenlik sunabilmesidir. Örneğin, 256-bit bir ECC anahtarı, RSA'nın 3072-bit anahtarına karşı eşdeğer güvenlik sağlayabilir. Bu özellik ECC'nin daha düşük hesaplama ve hafıza gereksinimleri ile işlem gücü ve enerji kısıtlamaları olan sistemlerde büyük avantaj sağlar [15]. ECC'nin genel güvenlik seviyesi, seçilen eğriye ve özel anahtarın boyutuna bağlıdır. Genellikle daha büyük anahtar boyutları daha güçlü güvenlik sağlar, ancak bu da daha fazla hesaplama kapasitesi gerektirir. ECC'nin sunduğu yüksek güvenlik ve performans verimliliği nedeniyle bilgi güvenliği kullanan süreçlerde yaygın tercih edilmektedir.

2.3. ECDSA (Elliptic Curve Digital Signature Algorithm)

ECDSA**,** bir mesajın doğruluğunu ve bütünlüğünü kanıtlamak için kullanılan bir sayısal imza algoritmasıdır. ECDSA mimarisi ECC teknikleri olan karakteristik p ve bir taban noktası G ile ayrık bir uzay Fq üzerinde tanımlanmış bir eliptik eğri E Etki alanı parametreleri üzerine kurulur [16]. Özellikle sunucu-clint arasında veri gizliliğinin sağlanması için kullanılan TLS/SSL'de ECDSA teknikleri kullanılır.

2.4. Advanced Encryption Standard(AES)

AES, simetrik bir blok şifreleme algoritmasıdır. AES, 128-bitlik bloklar halinde verileri şifreler ve bu nedenle bir blok şifre olarak adlandırılır. AES 128, 192 veya 256 bit uzunluğunda anahtarlarla çalışabilir. Bu seçenekler AES'in farklı güvenlik gereksinimlerine sahip uygulamalar için esnek bir seçenek olmasını sağlamaktadır [17]. Aynı zamanda AES, donanım hızlandırma avantajına sahiptir. Bu avantajı sayesinde çok büyük miktarda verinin hızlı bir şekilde şifrelenmesini ve şifresinin çözülmesini sağlar [17-18]. AES, güçlü güvenlik özellikleri ve geniş kabul görmesi nedeniyle veri gizliliği ihtiyacının olduğu birçok sektörde kullanılmaktadır.

2.5. Advanced Encryption Standard/Counter Mode (AES/GCM)

AES/GCM, son zamanlarda yaygın bir şekilde kullanılan simetrik şifreleme yöntemidir. AES/GCM, özellikle iletişim kanallarında veri bütünlüğünü ve güvenliğini sağlamak amacıyla tasarlanmıştır. Hem verilerin şifrelenmesi hem de kimlik doğrulama için kullanılır. Böylece her iki işlemi de tek bir adımda gerçekleştirir. GCM, gelişmiş bir hız ve güvenlik seviyesi sunar. Ayrıca paralel işlem kapasitesine sahip olması nedeniyle yüksek performanslı sistemlerde idealdir. GCM yaygın olarak ağ trafiğinin güvenliği, disk şifrelemesi veya dosya şifrelemesi olmak üzere bir dizi farklı uygulama için idealdir. Ayrıca TLS ve IPsec gibi birçok güvenlik protokolü standarttı AES/GCM'yi bir şifreleme seçeneği olarak kabul etmektedir [19].

4. Materyal ve Metot

4.1. Hibrit Şifreleme Yaklaşımı

Hibrit şifreleme, simetrik ve asimetrik şifreleme tekniklerinin bir arada kullanıldığı bir güvenlik stratejisidir. Bu yaklaşım hem simetrik hem de asimetrik şifreleme tekniklerinin avantajlarını birleştirerek, güçlü bir güvenlik çözümü sunar. ECC ve AES, hibrit bir şifreleme yaklaşımında birlikte kullanılabilir. Simetrik şifreleme yöntemi ECC kullanımı olarak ECDSA, asimetrik şifreleme yöntemi AES kullanımı olarak AES/GCM kullanılır. Hibrit şifreleme yaklaşımının ana prensibi oldukça basittir. Öncelikle, veri aktarımını başlatan taraf, rastgele bir simetrik anahtar oluşturur. Bu anahtar, veriyi şifrelemek ve çözmek için kullanılır. Daha sonra, bu simetrik anahtar, alıcının açık anahtarı ile şifrelenir. Alıcı, kendi özel anahtarı ile şifrelenmiş anahtarı çözer ve şifrelenmiş veriyi çözmek için simetrik anahtarı kullanır [20]. Bu yaklaşımın en önemli avantajı, simetrik ve asimetrik şifrelemenin birleştirilmesi ile güvenlik ve hız arasında etkili bir denge kurabilmesidir. ECDSA, güvenli bir anahtar dağıtımı sağlarken, AES/GCM, hızlı veri şifrelemesi, çözmek ve kimlik doğrulanmasını sağlar. Bu durum, özellikle büyük miktarda verinin aktarılması gereken durumlar için idealdir [21]. ECC'nin bir diğer önemli avantajı, kısa anahtar boyutları kullanırken güvenliğin sağlanabilmesidir. Bu, özellikle bant genişliği veya depolama alanı kısıtlı olan durumlar için yararlıdır. Öte yandan, AES/GCM, hem şifreleme hem de kimlik doğrulama özelliğine sahip olması nedeniyle, iletişimin bütünlüğünü ve kimlik doğrulamasını sağlar [22]. Bu yaklaşım, özellikle gizlilik ve bütünlük gerektiren birçok modern uygulamada değerli olabilir. Bu uygulamalar arasında bulut bilişim, e-sağlık hizmetleri, mobil uygulamalar, Internet of Things (IoT) cihazları ve daha fazlası bulunabilir [23].

4.2. Kablosuz Haberleşme ve Veri Güvenliği

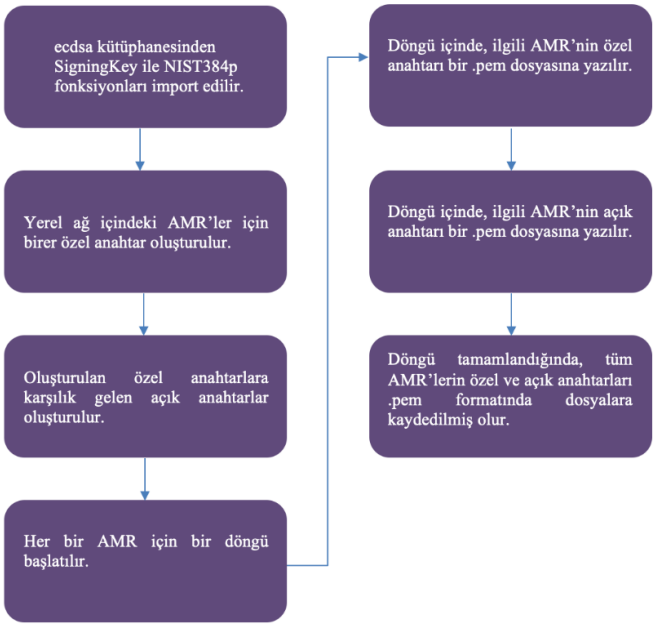
Kablosuz haberleşme, günümüzde yaygın olarak kullanılan mobil cihazlar, sensör ağları ve Internet of Things (IoT) cihazları gibi kablosuz ağlar üzerinden gerçekleştirilen iletişimi ifade etmektedir. Kablosuz haberleşme, bir dizi güvenlik zorluğuyla karşı karşıya kalmaktadır. Verilerin kablosuz ortamda iletilmesi,

fiziksel olarak korunmasız bir ortamda gerçekleştiği için saldırılara karşı daha savunmasız hale geldiği için, verilerin güvenliği ve gizliliği kablosuz haberleşme sistemlerinde büyük önem taşır [24]. Veri güvenliğini sağlamak için şifreleme yöntemleri kablosuz haberleşme sistemlerinde yaygın olarak kullanılır. Şifreleme, verileri anlaşılabilir halden şifreli bir forma dönüştürerek izinsiz erişime karşı korur. Kablosuz haberleşme sistemlerinde kullanılan şifreleme yöntemleri, güvenlik gereksinimlerini karşılamak ve verilerin bütünlüğünü, gizliliğini ve kimlik doğruluğunu sağlamak amacıyla tasarlanmıştır. Hibrit şifreleme, kablosuz haberleşme sistemlerinde yaygın olarak tercih edilen bir güvenlik stratejisidir. Bu yöntemde, simetrik ve asimetrik şifreleme algoritmaları bir arada kullanılır ve her bir algoritmanın avantajları birleştirilerek daha güçlü bir güvenlik çözümü elde edilir [25]. Asimetrik şifreleme anahtar değişimi ve kimlik doğrulama gibi işlemler için kullanılırken, simetrik şifreleme veri şifreleme ve şifre çözme için kullanılır [26]. Bu şekilde, hibrit şifreleme yaklaşımı, güvenli bir anahtar değişimi sağlarken veri şifrelemesi için hızlı ve etkili bir çözüm sunar. Kablosuz haberleşme sistemlerinde hibrit şifreleme yönteminin kullanılması, veri güvenliği konusunda önemli avantajlar sağlar. Asimetrik şifreleme algoritmaları, güvenli bir anahtar değişimi sağlayarak veri aktarımı sırasında izinsiz erişim riskini azaltır. Simetrik şifreleme algoritmaları ise hızlı veri şifrelemesi ve şifre çözme sunarak yüksek performanslı veri aktarımı sağlar. Bu nedenle, hibrit şifreleme yaklaşımı, kablosuz haberleşme sistemlerinde güvenlik ve performans arasında bir denge sağlar [27].

4.2. Python ile Hibrit Şifreleme Uygulaması

Bu çalışmada önerilen hibrit şifreleme yaklaşımı Python dili kullanarak geliştirilmiştir. Python çok amaçlı bir programlama dilidir ve ayrıca güçlü kütüphaneleri sayesinde şifreleme uygulamaları için popüler bir seçimdir. Çalışmada PyCryptodome kriptoloji kütüphanesinden *Crypto.Cipher* ve *Crypto.Random* modülleri kullanılmıştır. *Crypto.Cipher* modülü simetrik şifreleme için, *Crypto.Random* modülü ise rastgele veri üretme işlevleri için kullanılmaktadır. Crypto.Cipher modülünde, AES parametresi kullanılmıştır. *Crypto.Random* modülünde ise *get_random_bytes* parametresi kullanılmıştır [28]. Eliptik eğri dijital imza algoritması (ECDSA) kullanarak dijital imzalar oluşturulmasını ve doğrulamasını sağlamak için, ecdsa kütüphanesi kullanılmıştır. Ecdsa kütüphanesinden, özel anahtarları oluşturmak ve doğrulamak için SigningKey sınıfı ve 384 bitlik anahtar uzunluğuna sahip olması için NIST384p eğrisi kullanılmıştır [29]. National Institute of Standards and Technology (NIST) tarafından belirlenen 384 bitlik anahtar uzunluğu, oldukça güvenilir sayılmaktadır [30]. Ayrıca çeşitli kripto grafik hash işlevlerini sunan hashlib kütüphanesi kullanılmıştır. Hashlib kütüphanesinden, bir anahtar türetmek için SHA-256 hash işlevi kullanılmıştır. Anahtar oluşturma, şifreleme ve çözme adında 2 adet ayrı Python kod bloğu oluşturulmuştur. Hibrit şifrelemenin başarılı bir şekilde yapılması için tüm AMR'lerin açık anahtarları (public key) birbirleriyle paylaştırılır. Gizli anahtarlar (private key), her AMR'de sadece kendisinin gizli anahtarı olacak şekilde paylaştırılır. ECDSA ile oluşturulan açık anahtarlar AES/GCM aracılığıyla şifrelenip doğrulanır ve hedef AMR'ye şifrelenmiş veri iletilir. Şifrelenmiş veriyi teslim alan AMR, ECDSA ile oluşturulan gizli anahtarıyla kendisine gönderilen şifrelenmiş veriyi çözer. Böylelikle hibrit şifreleme ile veri transferi başarılı bir şekilde gerçekleşmiş olur. Bu sayede iletilen veriler aynı ağdaki AMR'ler haricinde hiçbir sistem tarafından okunamaz. Olası verilere yönelik bir siber saldırıda, saldırgan şifrelenmiş veriye ulaşsa bile, kendisinde gizli anahtar olmadığı için, şifreyi çözemez ve veriye ulaşamaz.

Hibrit şifreleme işleminin tam olarak gerçekleşmesi için, her AMR'de; .pem uzantılı kendisinin gizli anahtarı ve diğer AMR'lerin .pem uzantılı açık anahtarı bulunması gerekmektedir. Bunun için her AMR'de anahtar oluşturma algoritmasının tek seferlik aktif edilmesi gerekmektedir. Ayrıyeten şifreleme ve veri çözme algoritmalarının her AMR'de bulunması gerekmektedir. Python dili ile yazılan anahtar oluşturma algoritması akış diyagramı olarak Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4. Anahtar çifti oluşturma algoritması akış diyagramı

İletişimde güvenli şifreleme için kullanılacak algoritması geliştirilme adımları aşağıdaki gibi verilmiştir.

Adım 1:

- Şifreleme işlemleri için gereken AES ve get_random_bytes fonksiyonları Crypto.Cipher ve Crypto.Random modüllerinden içe aktarılır.
- ECDSA işlemleri için gerekli olan SigningKey ve NIST384p fonksiyonları ecdsa kütüphanesinden içe aktarılır
- Hash işlemleri için hashlib modülü içe aktarılır.

Adım 2:

- Gönderici AMR ile aynı ağda bulunan alıcı AMR/AMR'ler için birer özel anahtar .pem dosyalarından okunur ve bir Python sözlüğünde saklanır.
- Oluşturulan her bir özel anahtardan karşılık gelen açık anahtarlar elde edilir ve ayrı bir Python sözlüğünde saklanır.

Adım 3:

- İlk olarak, gönderici ve alıcı/alıcılar için bir döngü başlatılır.
- Gönderici ve alıcı/alıcıların anahtarları kullanılarak ortak bir anahtar hesaplanır.
- Bu ortak anahtar, bir SHA-256 hash işleminden geçirilerek AES şifrelemesi için kullanılan anahtar haline getirilir.
- Veri, bu anahtar kullanılarak AES şifrelemesi ile şifrelenir.
- Şifrelenmiş veri ve şifreleme bilgileri bir "tuple" olarak saklanır

Adım 4:

- Şifrelenmiş veri, her bir alıcı için ayrı bir .txt dosyasına yazılarak gönderilmeye hazır hale getirilir.

Şifre çözme algoritması aşağıda verilen adımlar kapsamında geliştirilmiştir.

Adım 1:

- Şifreleme işlemleri için gereken AES ve get_random_bytes fonksiyonları Crypto.Cipher ve Crypto.Random modüllerinden içe aktarılır.
- ECDSA işlemleri için gerekli olan SigningKey ve NIST384p fonksiyonları ecdsa kütüphanesinden içe aktarılır
- Hash işlemleri için hashlib modülü içe aktarılır.

Adım 2:

- Gönderici AMR ile aynı ağda bulunan alıcı AMR/AMR'ler için birer özel anahtar .pem dosyalarından okunur ve bir Python sözlüğünde saklanır.
- Oluşturulan her bir özel anahtardan karşılık gelen açık anahtarlar elde edilir ve ayrı bir Python sözlüğünde saklanır.

Adım 3:

- Gönderici AMR tarafından gönderilen şifrelenmiş, nonce, tag ve ciphertext olmak üzere 3 parçadan oluşan mesaj alınır.

Adım 4:

- İlk olarak, gönderici ve alıcı/alıcılar için bir döngü başlatılır.
- Gönderici ve alıcı/alıcıların anahtarları kullanılarak ortak bir anahtar hesaplanır.
- Bu ortak anahtar, bir SHA-256 hash işleminden geçirilerek AES şifrelemesi için kullanılan anahtar haline getirilir.
- Veri, bu anahtar kullanılarak AES şifrelemesi ile çözülür.

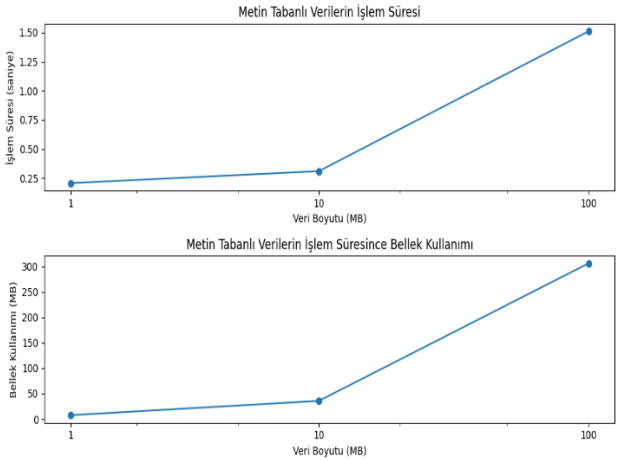
Adım 5:

- Çözülen veri, ekrana yazdırılarak işleme hazır hale getirilir.

5. Bulgular

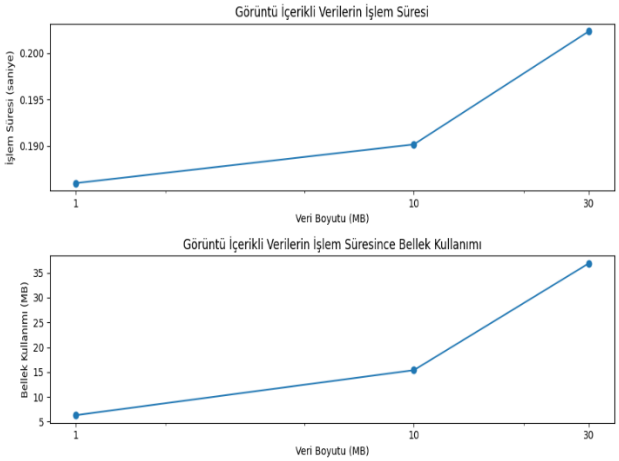
Otonom mobil robotlar genellikle; sensör verileri, kontrol komutları, görüntü/video verileri ve harita verileri kullanarak haberleşmektedir. Sensör verileri, kontrol komutları ve harita verileri metin tabanlı olarak ele alınmıştır. Görüntü/video verileri ise ayrı olarak ele alınmışlardır. Dolayısıyla Python dili ile yazılan, şifreleme ve şifre çözme algoritmaları; metin tabanlı, görüntü içerikli ve video içerikli olarak 3 adet farklı veri türü kullanılarak test edilmiştir. Algoritmalar, işlem süresi ve işlem süresince kullanılan bellek üzerinden performans testine tâbi tutulmuştur. İşlem süresi testi için, Python dili üzerinde yerleşik bulunan time kütüphanesi kullanılmıştır. İşlem süresince kullanılan bellek testi için ise Python dili üzerinde memory_profiler kütüphanesinin memory_usage modülü kullanılmıştır. Metin tabanlı veriler kullanılarak yapılan testlerde 1,10,100 MB boyutlarındaki dosyalar, görüntü içerikli veriler kullanılarak yapılan testlerde 1,10,30 MB boyutlarındaki dosyalar, video içerikli veriler kullanılarak yapılan testlerde 100,500,1000 MB boyutlarındaki dosyalar kullanılmıştır. Şifreleme algoritması sadece 1 alıcı AMR olacak şekilde düzenlenmiştir. Şifre çözme ile şifreleme algoritmaları kullanılarak yapılan test sonuçlarının aritmetik ortalaması alınmıştır. Elde edilen ortalama sonuçlar ve veri türleri kullanılarak, Python dili üzerinde matplotlib kütüphanesi aracılığıyla çizgi grafiği oluşturulmuştur.

Metin tabanlı verilerin işlem süresi ve işlem süresince bellek kullanımı ile ilgili oluşturulan çizgi grafiği Şekil 5'de belirtilmiştir. Metin tabanlı veri türleri için 1 MB boyutundaki dosyanın işlem süresi yaklaşık 0.25 saniye olarak ölçülmüştür. Bu değer ile 100 MB boyutundaki dosyanın işlem süresi arasında yaklaşık 1.25 saniye işlem süresi farkı olduğu ölçülmüştür. Ek olarak 1 MB boyutundaki dosyanın işlem süresince kullandığı bellek miktarı yaklaşık 7 MB olup, 100 MB boyutundaki dosyanın kullandığı bellek miktarı yaklaşık 300 MB'dir.



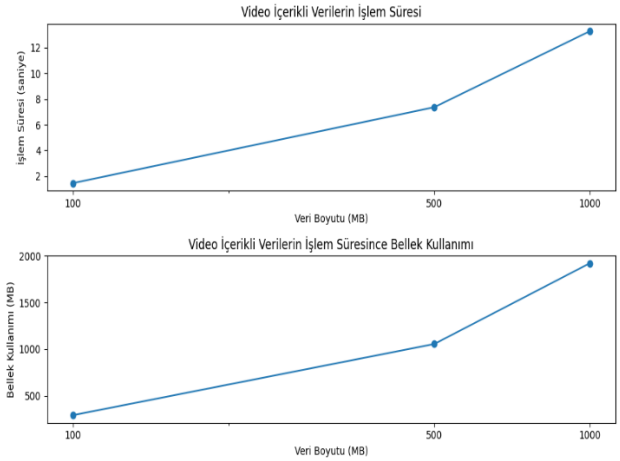
Şekil 5. Metin tabanlı verilerin çizgi grafiği

Görüntü içerikli verilerin işlem süresi ve işlem süresince bellek kullanımı ile ilgili oluşturulan çizgi grafiği Şekil 6'de belirtilmiştir. Görüntü içerikli veri türleri için 1 MB boyutundaki dosyanın işlem süresi yaklaşık 0.2 saniye olarak ölçülmüştür. Bu değer ile 30 MB boyutundaki dosyanın işlem süresi arasında yaklaşık 0.4 saniye işlem süresi farkı olduğu ölçülmüştür. Ek olarak 1 MB boyutundaki dosyanın işlem süresince kullandığı bellek miktarı yaklaşık 3 MB olup, 30 MB boyutundaki dosyanın kullandığı bellek miktarı yaklaşık 100 MB'dir.



Şekil 6. Görüntü İçerikli Verilerin Çizgi Grafiği

Video içerikli verilerin işlem süresi ve işlem süresince bellek kullanımı ile ilgili oluşturulan çizgi grafiği Şekil 7'de belirtilmiştir. Video içerikli veri türleri için 100 MB boyutundaki dosyanın işlem süresi yaklaşık 1 saniye olarak ölçülmüştür. Bu değer ile 1000 MB boyutundaki dosyanın işlem süresi arasında yaklaşık 10 saniye işlem süresi farkı olduğu ölçülmüştür. Ek olarak 100 MB boyutundaki dosyanın işlem süresince kullandığı bellek miktarı yaklaşık 300 MB olup, 1000 MB boyutundaki dosyanın kullandığı bellek miktarı yaklaşık 1900 MB'dir.



Şekil 7. Video İçerikli Verilerin Çizgi Grafiği

Ölçülen sonuçlarla, benzer hibrit şifreleme yöntemleri [31-33] ile ilgili çalışmalar ile kıyaslandığında kabul edilebilir bir performans sergilediği ve AMR'ler arasındaki kablosuz iletişim sırasında veri güvenliğini sağlayabildiği gözlenmiştir.

6. Sonuç

Bu çalışmada, otonom mobil robotların kablosuz haberleşme esnasında veri güvenliğini sağlamak amacıyla hibrit bir şifreleme yöntemi olan ECC ve AES yöntemlerinin bir arada kullanılarak veri güvenliğinin sağlanması önerilmiştir. Bu araştırmada, ECC ve AES'in birlikte kullanıldığı ECDSA-AES/GCM yöntemi ile AMR'ler arasında kablosuz iletişim sırasında oluşabilecek veri sızıntılarının önüne geçilmesi hedeflenmiştir. Çalışmanın sonucunda, bu hibrit şifreleme yöntemi ile AMR'ler arasında gerçekleştirilen veri iletiminin güvenli olduğu görülmüştür. Asimetrik şifreleme yöntemi ECC'nin güvenlik performansı ve simetrik şifreleme yöntemi AES'in hızlı iletişim ayrıcalığı, AMR'lerin kablosuz haberleşmeleri sırasında kullanılan verilerin güvenliğini sağlamakla kalmamış, ayrıca şifrelenmiş verilerin ulaşımını da hızlı bir şekilde sağlamayı başarmıştır. Bu çalışmanın ilgili şifreleme yapacak olanlara bir alternatif sağlama yolunda örnek olması düşünülebilir.

Kaynaklar

[1] Işık A.H., Çetin Ö. Multifunctional and Low Cost Autonomous Mobile Robot. Gazi Journal of Engineering Sciences, 6(2), 105-110, 2020.

[2] Siegwart R, Nourbakhsh I.R., Introduction to Autonomous mobile robots. The MIT Press, USA, 2004.

[3] Jaulin L. Mobile robotics. ISTE Press Elsevier, USA, 2007.

[4] To AWK, Paul G, Liu D. A comprehensive approach to real-time fault diagnosis during automatic grit-blasting operation by autonomous industrial robots. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 49(1), 13-23, 2018.

[5] Intel. Otonom Mobil Robot (AMR) Genel Bakış. http://www.intel.com.tr (Erişim Tarihi: 22.05.2023).

[6] Milvus Robotics. Otonom Mobil Robotlar- AGV- AMR. http://www.milvusrobotics.com/tr/blog (Erişim Tarihi: 22.05.2023).

[7] Optimak Optimum STU. Otonom Mobil Robot Nedir? http://www.optimak.com.tr/otonom-mobil-robot-nedir/ (Erişim Tarihi: 22.05.2023).

[8] Advanced Motion Controls. Otonom Mobil Robotlar için Motor Kontrolörleri. http://www.a-m-c.com (Erişim Tarihi: 22.05.2023).

[9] TechCrunch. Erişim Tarihi: 2.06.2023. http://techcrunch.com/2022/04/12/aethon-robots-hospitals-hijacks/

[10] The Verge. Erişim Tarihi: 2.06.2023. https://www.theverge.com/2022/6/21/23177756/amazon-warehouse-robots-proteus-autonomous-cart-delivery

[11] Menezes AJ, van Oorschot PC, Vanstone SA. Handbook of applied cryptography. CRC press, 1996.

[12] Rivest RL, Shamir A, Adleman L. A method for obtaining digital signatures and public-key cryptosystems. Communications of the ACM, 21(2), 120-126, 1978.

[13] Diffie W, Hellman ME. New directions in cryptography. IEEE transactions on Information Theory, 22(6), 644-654, 1976.

[14] Wikipedia. Elliptic-curve cryptography. http://en.wikipedia.org/wiki/Elliptic-curve_cryptography (Erişim Tarihi: 24.05.2023).

[15] Barker E, Barker W, Burr W, Polk W, Smid M. Recommendation for Key Management – Part 1: General (Revision 4). National Institute of Standards and Technology, 2016.

[16] Johnson D, Menezes A, Vanstone S. The Elliptic Curve Digital Signature Algorithm (ECDSA). International Journal of Information Security, 1(1), 36-63, 2001.

[17] Ferguson N, Schneier B, Kohno T. Cryptography Engineering: Design Principles and Practical Applications. Wiley Publishing, 2010.

[18] Daemen J, Rijmen V. The Design of Rijndael: AES - The Advanced Encryption Standard. Springer, 2002.

[19] McGrew D, Viega J. The Galois/Counter Mode of Operation (GCM). National Institute of Standards and Technology, 2004. http://csrc.nist.gov/publications/detail/sp/800-38d/final

[20] ElGamal T. A public key cryptosystem and a signature scheme based on discrete logarithms. IEEE transactions on information theory, 31(4), 469-472, 1985.

[21] Barkan E, Biham E, Keller N. Instant ciphertext-only cryptanalysis of GSM encrypted communication. Journal of cryptology, 21(3), 392-429, 2005.

[22] Bernstein DJ. Introduction to post-quantum cryptography. Springer, Berlin, Heidelberg, 2009.

[23] Hu H, Ahn GJ, Jorgensen J. Detecting and resolving privacy conflicts for collaborative data sharing in online social networks. Proceedings of the 27th annual computer security applications conference, 103-112, 2011.

[24] Li Q, Li Y, Li X. Wireless Communication Security: A Survey. Security and Communication Networks, 2018, 1091493.

[25] Rivest RL, Shamir A, Adleman L. A Method for Obtaining Digital Signatures and Public-Key Cryptosystems. Communications of the ACM, 21(2), 120–126, 1978.

[26] Daemen J, Rijmen V. The Design of Rijndael: AES - The Advanced Encryption Standard. Springer, 2002.

[27] Kamaludin NS, Razak MZA, Abdullah AH. Review of Hybrid Cryptography Algorithms for Secure Multimedia Communication. Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering, 6(1), 15–19, 2014.

[28] Legrand S, Lackorzynski A. PyCryptodome Documentation. http://www.pycryptodome.org (Erişim Tarihi: 2023).

[29] Langley A, Hamburg M. Elliptic Curve Digital Signature Algorithm (ECDSA). http://www.ecdsa.org (Erişim Tarihi: 2023).

[30] National Institute of Standards and Technology. Recommended Elliptic Curves for Federal Government Use, 2023.

[31] Yıldırım, K., & Demiray, H. E. (2008). Simetrik ve asimetrik şifreleme yöntemlerine metotlar: çirpilmiş ve birleşik akm-vkm. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 23(3).

[32] Zhang, Q. (2021, January). An overview and analysis of hybrid encryption: the combination of symmetric encryption and asymmetric encryption. In 2021 2nd international conference on computing and data science (CDS) (pp. 616-622). IEEE.

[33] Alkady, Y., Habib, M. I., & Rizk, R. Y. (2013, December). A new security protocol using hybrid cryptography algorithms. In 2013 9th International Computer Engineering Conference (ICENCO) (pp. 109-115). IEEE.

Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi
International Journal of Technological Sciences
UTBD
IJTS

Araştırma Makalesi/Research Article

Adaptive learning based content management tool for online education platforms

Onur Mahmut Pişirir *[1]

[1] Suleyman Demirel University, Distance Education Application and Research Center, 32200, Isparta, Türkiye

Keywords
Adaptive learning
Adaptive hypermedia
e-Learning
Random forest

Article history:
Received: 20.08.2023
Accepted: 13.09.2023

Abstract: The ways of accessing information are highly developed today. Online education platforms are widely used directly or indirectly in the education of students. Instructors create their course content on these platforms and teach their courses to their students. With the developing internet technologies, the variety of visual, audio and textual course content is also increasing. However, students' learning tendencies differ while studying these course contents. While some of the students can learn more easily from course content consisting only of texts, others can learn more easily from course content supported by audio-visual materials. Identifying these learning differences among students has become important today. In order to enrich learning activities, it would be useful to create content in accordance with the learning tendencies of each student. In this study, we developed an adaptive learning-based help tool for instructors to create course content. This tool analyzes the learning styles of the students and provides recommendations to the instructor for creating the course content. Thus, all the course content prepared by the instructor will be selected and created according to the learning tendencies of the students. It will contribute to the improvement of learning activities.

Atıf için/To Cite: Pişirir O.M. Adaptive Learning Based Content Management Tool for Online Education Platforms. Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi, 15(2), 73-79, 2023.

Çevrimiçi eğitim platformları için adaptif öğrenme tabanlı içerik yönetim aracı

Anahtar Kelimeler
Adaptif öğrenme
Adaptif hipermedya
e-Öğrenme
Rastgele orman

Makale geçmişi:
Geliş Tarihi: 20.08.2023
Kabul Tarihi: 13.09.2023

Öz: Bilgiye erişim yolları günümüzde oldukça gelişmiş durumdadır. Online eğitim platformları yaygın bir şekilde öğrencilerin eğitimlerinde doğrudan veya dolaylı olarak kullanılmaktadır. Eğitmenler ders içeriklerini bu platformlar içinde oluşturup öğrencilerine derslerini anlatmaktadırlar. Gelişen internet teknolojileri ile görsel, işitsel ve metin olarak ders içeriklerinin çeşitliliği de artmaktadır. Ancak öğrencilerin bu ders içeriklerini çalışırlarken öğrenme eğilimleri farklılaşmaktadır. Öğrencilerin bir kısmı sadece metinlerden oluşan ders içeriklerinden daha rahat öğrenebiliyorken, diğer bir kısmı görsel ve işitsel materyallerle desteklenmiş ders içeriklerinden daha rahat öğrenebilmektedir. Öğrencilerin arasındaki bu öğrenme farklılıklarını tespit edebilmek günümüzde önemli hale gelmiştir. Öğrenme faaliyetlerini zenginleştirmek için her öğrencinin öğrenme eğilimine uygun olarak içerik oluşturulması faydalı olacaktır. Bu çalışmada ders içeriklerini oluşturacak eğitmenler için adaptif öğrenme tabanlı bir yardım aracı geliştirilmiştir. Bu yardımcı araç öğrencilerin öğrenme yöntemlerini analiz ederek eğitmene ders içeriğini oluşturma konusunda tavsiyeler vermektedir. Böylece eğitmenin hazırladığı tüm ders içeriği öğrencilerin öğrenme eğilimlerine göre seçilip oluşturulacaktır. Öğrenme faaliyetlerinin iyileştirilmesinde katkısı olacaktır.

1. Introduction

E-learning is the online platforms used by educational institutions to deliver courses and learning activities. Used as a complement or alternative to traditional education, e-learning has become widespread in recent years, especially due to the Covid-19 pandemic [1]. In the contemporary era, utilizing electronic slides, the internet, emails, electronic learning platforms, and e-course materials has become a norm during course

* İlgili yazar/Corresponding author: onurpisirir@sdu.edu.tr

presentations. When integrating ICT into lectures, it becomes the responsibility of educators to furnish students with valuable and high-quality information. Numerous instructors who adopt ICT in their teaching methods affirm that its incorporation alongside traditional approaches facilitates smoother lessons and student engagement, rendering classes more dynamic and captivating. Various e-activities also contribute to enhancing the depth of subject matter. E-learning extends an alternative avenue to students, aiding them in achieving equilibrium between personal life, professional pursuits, and education. This modality epitomizes dynamic and enriching learning, lessening dependence on time and physical location. It delivers both personalized learning experiences and opportunities for collaborative engagement among peers [2].

For e-learning to be implemented effectively, potential learning difficulties that learners may face should be taken into account. Instructors' skills should be developed and adequate support should be provided [3]. In existing e-learning systems, the same learning content is presented to different learners. However, an enriched environment for one learner may not always be enriched for another. Learners' preferences, abilities and educational levels are diverse and various types of content are required in learning topics to adapt the learning content to the needs of different learners [4]. A well-designed and sophisticated online learning environment can encourage students to learn, simplify the learning process, facilitate deeper understanding and increase collaboration, which can contribute not only to increasing students' knowledge but also to improving their learning and communication abilities [5]. Adaptive Educational Systems (AES) prove highly valuable in facilitating teaching-learning endeavors. These environments harness intelligent methodologies to tailor educational content in accordance with learners' actual requirements. The objective is to furnish a more customized and tailored learning encounter. These systems should possess the capability to construct educational routes for students, stemming from their previous knowledge, engagements, and inclinations. In simpler terms, an AES should present personalization aligned with the distinctive necessities, expertise, and background of each student. To ensure the efficacy of this personalization, a model capturing the fundamental attributes of learners is imperative [6]. In the realms of intelligent tutoring and Adaptive Hypermedia (AH) systems, there is an ongoing development of personalized e-Learning systems. These systems within AH frameworks customize content according to the user's learning requirements, offering the utmost pertinent material and navigation routes [7].

Adaptive hypermedia systems build a model of each user's goals, preferences and knowledge by collecting and analyzing data about the user's interactions with the system. This data may include the user's browsing history, search queries, feedback and other relevant information. The system then uses this model to tailor the presentation of information and links to the user's needs [8].

This article consists of six sections with an introduction. In the second section, the studies presented in the literature on adaptive learning, learning management systems and research on students' study tendencies are presented. The third section provides information about Moodle learning management system, random forest algorithm and content filtering. In the fourth section, the results of the research are analyzed and interpreted in detail. In the fifth section, conclusions and recommendations are presented.

2. Literature Review

In the literature, systems have been created with different adaptive learning models. Elghouch et al. [9], ALS_CORR[LP], an e-learning system that adapts to learners' needs and learning styles. By analyzing learners' characteristics and learning styles, they customized the learning materials and optimized the learning process. Yasuda et al. [10], studied the implementation of adaptive learning systems using Bayesian networks. With their system, they effectively measured students' understanding and adapted the content according to the students' level of understanding through a field experiment in an elementary school in Japan. Vagale et al. [11], They conducted a study on the implementation of a personalized adaptive e-learning system. In the paper, they proposed an architecture using learner model, content model and alignment model. They used the Moodle platform to develop the system. Chen et al. [12], conducted a review on customized learning systems and recommender systems in order to provide more time for more effective understanding of learning materials. They also proposed a mathematical framework for the evaluation of recommendation strategies. Onah and Sinclair [13], propose a framework that recommends teaching material according to the learner's profile and provides a recommended learning path to meet the learning objectives. The framework aims to replicate the function of a human tutor by providing personalized recommendations. Tseng et al. [14], proposed an innovative adaptive learning approach based on learning behavior and personal learning style. They implemented it using questionnaires for theory and practice. They analyzed each student's interactions and learning outcomes when adjusting the subject materials.

In this study, a random forest algorithm is used to create a tool for adaptive learning-based content creation. Students' learning tendencies on Moodle LMS were measured by creating a course content. Content was added in 5 main categories: Video, Visual, Text, Video+Text and Visual+Text. The tendency of each student was tabulated with the scores they received in these materials. Students' learning tendencies were determined with the random forest algorithm. Then, with the tool created, the course materials in the learning management system were personalized according to their tendencies. Thus, each student was able to access their personalized pages according to their different learning tendencies. The contribution of the study to the literature can be examined in many ways. Adaptive learning integration for Moodle can make the learning experience on educational platforms more effective. In the field of education, it can make significant contributions in areas such as the effectiveness of individualized learning approaches, student performance monitoring, teacher guidance, effectiveness of educational technologies and data analysis. Such integrations can be a powerful tool to enhance the learning experience and make education more effective.

3. Material and Method

Moodle stands as a 'Learning Management System' (LMS), which is characterized as a web-based application equipped with integrated software, designed to furnish a digital learning milieu. This system is engineered to manage interactive online courses effectively. Through the LMS, an online arena is established to facilitate various facets of student-teacher interaction, both synchronous and asynchronous. This encompasses functions such as assessments, report generation, tracking learning advancements, monitoring student engagements, and furnishing students with feedback [15]. Moodle LMS is one of the popular systems suitable for the application of advanced digital technologies in the educational process [16]. Moodle is an open source system and can be easily programmed. It is modular and widely used. API support is its most important feature. It allows to make different plugins easily with its wide range of APIs. For this reason, Moodle LMS with Web API was used for system design.

3.1. Moodle Web Services

Moodle stands as a free, open-source learning management system scripted in PHP. Operating on a modular and object-oriented framework, Moodle functions as a dynamic learning platform, fostering interaction among educators, administrators, teachers, and students by facilitating the exchange of personalized educational resources. By incorporating a web services API, Moodle provides the means to expose your plugin's capabilities, encompassing functions like user management, registration, event creation, and various core operations. This requires an initial activation of web services by the system administrator, paving the way for REST API endpoints. After this setup, your system's core functionality becomes accessible to external systems through web services, utilizing protocols like XML-RPC, REST (predominantly employed), or SOAP. Secure access to each web service is granted through a token, established by the system administrator [17].

3.2. Random Forest

Random Forest, a machine learning algorithm, predominantly utilizes classification and regression trees to yield mostly substantial outcomes. It demonstrates flexibility, user-friendliness, and efficiency. The RF algorithm falls within the ensemble learning algorithm category, employing the bagging method. A key advantage of the random forest lies in its ability to address both classification and regression issues, forming the foundational principles of other machine learning algorithms. The constituent decision trees of the random forest are constructed concurrently, encompassing both classification and regression trees. Within each decision tree, nodes are partitioned using optimal attributes that derive the finest solution across all features. Notably, the RF algorithm has emerged as a prevalent technique for unearthing concealed insights within extensive datasets. In a random forest, training sets are initially generated through bootstrapping, each leading to the creation of an individual decision tree. The outcome of the algorithm materializes as a collective result of these operations [18]. In Figure 1, there is a recursive partitioning illustrated within a two-dimensional input space, employing boundaries aligned with the axes. At each step, the input space undergoes partitioning, always following a direction parallel to one of the axes. The first partition occurs on $x2 \geq a2$. Then, the two subspaces are split again: The left branch is split on $x1 \geq a4$. The right branch is first split on $x1 \geq a1$ and one of its sub-branches is split on $x2 > a3$ [19].

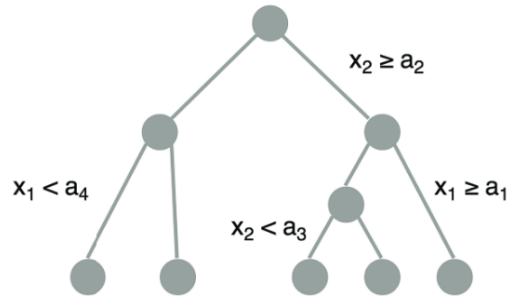


Figure 1. Random forest algorithm [19]

A frequently employed criterion for partitioning in classification scenarios is entropy. This criterion is a tangible application of the source coding theorem, which establishes a minimum length for the bit representation of any arbitrary variable. Equation 1 provides the expression for the entropy at each internal node within the decision tree. In the context of decision trees, where the goal is to make informed splits, the parameter "c" signifies the count of distinct classes present within the dataset, p_i represents the prior probability assigned to each individual class. Maximizing this value holds significance as it enables the extraction of the highest amount of information during the process of decision tree partitioning.

Alternatively, when addressing regression tasks, a prevalent criterion utilized for partitioning is the mean squared error [19], [20].

$$E = -\sum_{i=1}^{c} p_i \times \log(p_i) \tag{1}$$

The pseudo code of the random forest algorithm is given in Algorithm 1.

Algorithm 1. Random Forest	
1.	*for i ← 1 to B do*
2.	*Draw a bootstrap sample of size N from the training data;*
3.	*while node size != minimum node size do*
4.	*randomly select a subset of m predictor variables from total p;*
5.	*for j ← 1 to m do*
6.	*if jth predictor optimizes splitting criterion then*
7.	*split internal node into two child nodes;*
8.	*break;*
9.	*end*
10.	*end*
11.	*end*
12.	*end*
13.	*return the ensemble tree of all B subtrees generated in the outer for loop;*

Random Forest is an ensemble learning algorithm used in machine learning to solve classification and regression problems. It is used to predict a particular category. It is used to identify important features and to predict features. Therefore, it was determined as the appropriate algorithm for the system. With the training of the model used, the train accuary score was calculated as 94%.

3.3. Content-Based Filtering

An adaptive learning system comprises a multitude of models employed to analyze and comprehend user behaviors, culminating in the formulation of tailored learning trajectories for individual users. Two widely embraced methodologies for constructing such adaptive learning models are content-based filtering and collaborative filtering [21]. Content-based filtering (CBF), among the most effective recommendation approaches, hinges on item correlations. It leverages item data, manifesting as attributes, to compute resemblances among items. By assessing item descriptions and user inclinations, CBF algorithms provide users with fitting recommendations. Notably, these algorithms solely rely on the profile details or ratings of the present user. As a result, they can yield precise recommendations even in scenarios where the volume of ratings from other users is relatively limited [22]. Equation 2 shows the model. Where C_i is the rating estimate and is used to estimate the probability that an item belongs to any class.

$$P(C_i|X) = \prod_{k=1}^{n} P(X_k|C_i) \tag{2}$$

Each instance of an item X is described by a combination of ⟨x1, x2, ...xk⟩ item attribute values. Nonetheless, the Content-Based Filtering (CBF) approach falls short in delivering accurate recommendation outcomes when the content lacks sufficient data for item classification. There are instances where either domain expertise or an ontology becomes essential for pinpointing the crucial attributes that hold significance in the recommendation process. The calculation of the weights is as in Equation 3. Here the weight values obtained from a social network graph are used to predict user preferences. S is the similarity between objects O_i and O_j. ω_n represents the weight assigned to attribute A_n between objects O_i and O_j while the function f varies based on the attribute type. [22].

$$S(O_i, O_j) = \omega_1 f(A_{1i,} A_{1j}) + \omega_2 f(A_{2i,} A_{2j}) + \cdots + \omega_n f(A_{ni,} A_{nj}) \tag{3}$$

4. Results and Discussion

Web API was developed using ASP .Net to establish the system. Additionally, an MS-SQL database was integrated to store user profiles. Within this database, the performance scores of students engaging with Moodle activities are recorded. This data is then extracted and categorized using a random forest algorithm, enabling the identification of students' learning preferences. The adaptive content filter communicates these recommendations to students, indicating which course materials they should focus on. A specialized web API operates in tandem with this data, activating functions within Moodle. This facilitates the grouping of students, ensuring that content relevant to their specific group is presented to them. Figure 2 graphically illustrates the operation of the system.

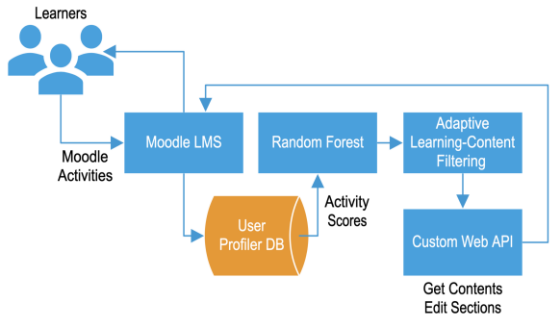


Figure 2. System diagram

The course activities of the students added on Moodle were monitored for a semester. At the end of the semester, their scores on the course content were recorded in the grades field. The data is organized with activities kept in separate fields. The dataset has a dimension of 568 rows and 26 columns. Notably, it appears that each learning tendency category is equally represented in this dataset. Table 1 shows the learning tendencies of 568 students. This table shows the students' total score for each learning tendency. However, all dataset fields were used in the training of the data. Students score between 1-100 points for each learning activity. For example, if the student worked intensively on activities with visual elements, his/her score would be close to 100. Then the scores for each learning activity category are summed up and the scores on Table 1 are obtained. The lowest score on Table 1 is 141 and the highest score is 432.

It shows the scores that each of the students received from different categories of activities during the semester. According to this, students score high in the activity in which they are most engaged. The data of the table was classified with the random forest algorithm and the learning tendencies of the student was determined in the result section.

Table 1. Students' learning tendencies

ID	Video +Text	Video	Visual	Visual +Text	Text	Result
1	255	159	326	187	158	Visual
2	271	353	281	308	274	Video
3	260	152	320	309	189	Visual
4	252	278	354	202	204	Visual
5	374	236	193	224	181	Video+ Text
6	216	185	278	194	225	Visual
7	123	189	322	331	277	Visual +Text
8	256	271	359	167	354	Visual
9	172	166	287	313	350	Text
10	171	263	272	204	206	Visual
11	238	83	232	148	240	Text
12	231	251	297	189	307	Text
13	310	263	211	221	168	Video+ Text
14	207	264	287	289	270	Visual +Text
15	260	220	261	278	309	Text
...						
567	258	299	298	193	307	Text
568	242	130	155	296	171	Visual +Text

After the learning tendency of the student is determined, the web service required for the content of the course pages to be placed in the learning management system is running. Figure 2 shows the diagram of the running system.

Once users' learning tendencies have been identified An adaptive learning engine runs for content filtering and sends the data to the Web service. The web service runs two methods in Moodle. The first method is to identify all the content in the course. Here the instructor has to have created all the content of the course. The second method is to display the relevant content. Figure 3 shows the course content. Within the content, each topic is shown in separate areas. The instructor adds content from each topic and organizes the activities under 5 topics (Visual, Text, Video, Visual+Text, Video+Text) according to different learning conditions. The content of each learning tendency is different.

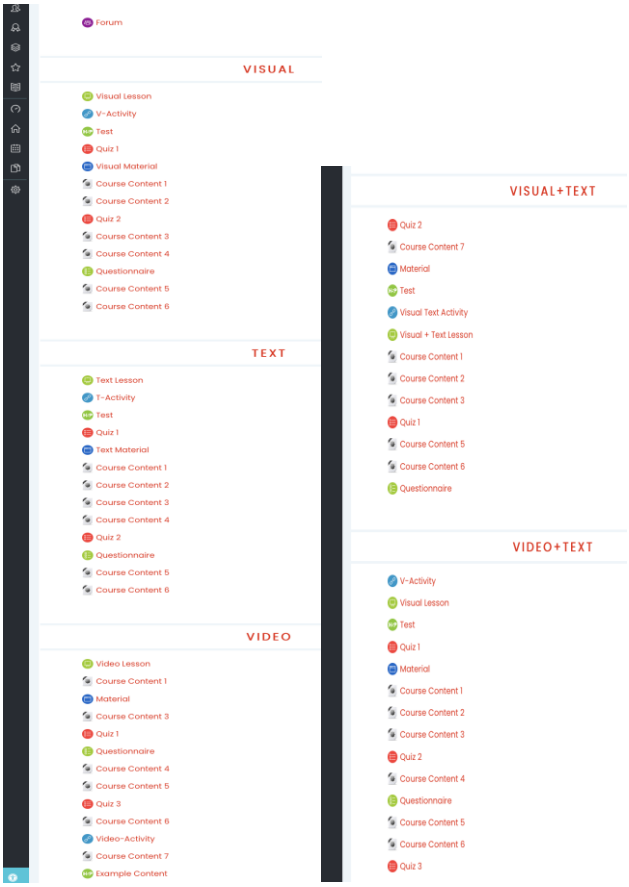


Figure 3. Example course contents

Whichever the student's learning tendency is (Visual, Text, Video, Visual+Text, Visual+Text, Video+Text), these contents will be seen intensively in the student's lesson. Different activities can be used to separate the lesson activities here. However, in order to diversify the course content, this service will work and the appearance of the course content will change. Thus, the page structure for the learner will be reconstructed according to his/her interest.

All content components are grouped under the same topic so that learners do not get lost in differentiated content. In this way, the learner will be able to easily find a different content on the page within the relevant topic without searching for it. It will save time and resources by helping them avoid repeating content they do not need or have already learned. This will allow students to focus more on new topics and will positively affect their learning performance while studying. Figure 4 shows a regular course content followed by a personalized course content from the same course. Since the learners are divided into different groups, they see the course content as limited. Each learner accesses a different area outside of their own course content.

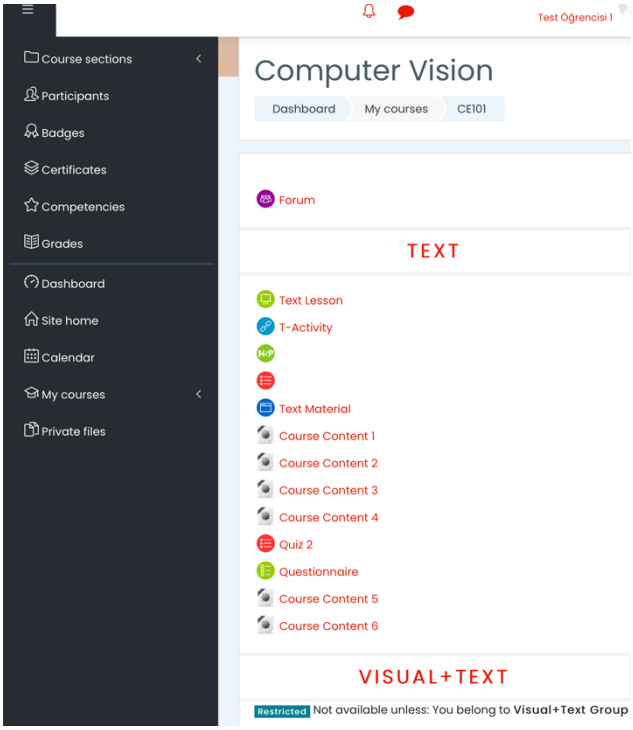


Figure 4. Example course contents (Student's page)

The restrictions are grouped and made accessible to the student in the relevant category. Students cannot see different versions of the same course content.

The approach used in this study differs from the methods typically found in the literature. Instead of employing generalized models that apply to all students, this study implements a student-centered system. It recognizes that each student possesses unique learning tendencies and comprehension levels. While previous studies measured students' study tendencies using questionnaires, this study introduces a personalized learning system. This means that individualized pages can be tailored to each student, ensuring that they receive relevant content without any classroom-wide confusion.

5. Conclusion

Adaptive learning is an approach to learning that aims to provide an individualized and flexible learning experience. This approach aims to create a customized learning plan that takes into account the student's learning needs, pace, interests and learning style. Today, institutions that carry out educational activities in many fields benefit from online education activities. With the developing technology and opportunities, these opportunities can be used in almost every field. However, every person's learning tendency is different. Personalized methods need to be created on educational platforms.

With the proposed system, learning processes can be optimized by providing students with fast and effective learning experiences. Students can achieve better learning results by spending more time on the subjects they are interested in or deficient in. Adaptive systems can reduce students' information overload. It prevents information clutter by providing students with only the content they need and are interested in.

However, the system has some limitations. In order to create the course content, separate content from each category should be created and added to the system. This is a long process for the instructor. For the learner, content that is constantly created according to his/her own tendencies may become self-limiting. For future studies, systems that can be further enriched can be created by taking different contents from different platforms and comparing the contents and adding them to the system.

References

[1] Khaldi A, Bouzidi R, Nader F Gamification of e-learning in higher education: a systematic literature review, Smart Learn. Environ., vol. 10, no. 1, p. 10, Jan. 2023.

[2] Kofuji S, Ed. E-Learning - Engineering, On-Job Training and Interactive Teaching. InTech, 2012.

[3] Delungahawatta T et al. Advances in e-learning in undergraduate clinical medicine: a systematic review, BMC Med. Educ., vol. 22, no. 1, p. 711, Oct. 2022.

[4] Yarandi M, Jahankhani H, Tawil ARH An adaptive e-learning Decision support system, in 2012 15th International Conference on Interactive Collaborative Learning (ICL), Sep. 2012, pp. 1–5.

[5] Ghislandi P, Ed., eLearning - Theories, Design, Software and Applications. InTech, 2012.

[6] Ferreira HNM, Brant-Ribeiro T, Araújo RD, Dorça FA, Cattelan RG An Automatic and Dynamic Student Modeling Approach for Adaptive and Intelligent Educational Systems Using Ontologies and Bayesian Networks, in 2016 IEEE 28th International Conference on Tools with Artificial Intelligence (ICTAI), Nov. 2016, pp. 738–745.

[7] Yarandi M, Jahankhani H, Tawil ARH A personalized adaptive e-learning approach based on semantic web technology. http://www.webology.org/2013/v10n2/a111.pdf (Accessed: 10.07.2023).

[8] De Bra P Adaptive Hypermedia, in Handbook on Information Technologies for Education and Training, Adelsberger HH, Kinshuk, Pawlowski JM, Sampson DG, Eds., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008, pp. 29–46.

[9] Elghouch N, En-Naimi EM, Seghroucheni YZ, El Mohajir BE, Achhab MA ALS_CORR[LP]: An adaptive learning system based on the learning styles of Felder-Silverman and a Bayesian network, in 2016 4th IEEE International Colloquium on Information Science and Technology (CiSt), Oct. 2016, pp. 494–499.

[10] Yasuda K, Kawashima H, Hata Y, Kimura H Implementation Of An Adaptive Learning System Using A Bayesian Network, 11th International Conference Mobile Learning 2015.

[11] Vagale V, Niedrite L, Ignatjeva S Implementation of Personalized Adaptive E-learning System, Balt. J. Mod. Comput., vol. 8, no. 2, 2020.

[12] Chen Y, Li X, Liu J, Ying Z Recommendation System for Adaptive Learning, Appl. Psychol. Meas., vol. 42, no. 1, pp. 24–41, Jan. 2018.

[13] Onah DFO, Sinclair JE Massive Open Online Courses – An Adaptive Learning Framework, ResearchGate, Mar. 02, 2015.

[14] Tseng JCR, Chu HC, Hwang GJ, Tsai CC Development of an adaptive learning system with two sources of personalization information, Comput. Educ., vol. 51, no. 2, pp. 776–786, Sep. 2008.

[15] Rimsha S, Moosa FA, Zaheer F, Kamal MT, Majid A What Does the Future Hold for a Surgical Trainee? This Lockdown Is Not a Letdown Yet: A Survey on Moodle Learning Management System as a Part of Blended Learning During COVID-19 Pandemic, Cureus, Jul. 2021.

[16] Morze N, Varchenko-Trotsenko L, Terletska T, Smyrnova-Trybulska E, Implementation of adaptive learning at higher education institutions by means of Moodle LMS, J. Phys. Conf. Ser., vol. 1840, no. 1, p. 012062, Mar. 2021.

[17] Moodle Web Service APIs, DEV Community, https://dev.to/udarajayawardena/moodle-web-service-apis-51k4 (Accessed: 19.07.2023).

[18] Kumral CD, Topal A, Ersoy M, Çolak R,Yiğit T Random Forest Algoritmasının FPGA Üzerinde Gerçekleştirilerek Performans Analizinin Yapılması , El-Cezeri Fen ve Mühendis. Derg., Dec. 2022.

[19] Schonlau M, Zou RY The random forest algorithm for statistical learning, Stata J. Promot. Commun. Stat. Stata, vol. 20, no. 1, pp. 3–29, Mar. 2020.

[20] Çayır A Performance Comparison of Locality Sensitive Hashing and Random Forest Algorithms for Handwritten Digits Recognition. Master Thesis, Kadir Has University, Graduate School of Science and Engineering,İstanbul, Türkiye,2014.

[21] López AC What algorithms are used for adaptive learning?, https://canopylab.com/what-algorithms-are-used/ (Accessed: 20.07.2023).

[22] Son J, Kim SB Content-based filtering for recommendation systems using multiattribute networks, Expert Syst. Appl., vol. 89, pp. 404–412, Dec. 2017.

Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi, 15(2), 80-94, 2023 DOI: 10.55974/utbd.1223938

Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi

International Journal of Technological Sciences

UTBD IJTS

Derleme Makale/Review Article

Nano-malzemelerin geopolimer betonun termal davranışlarına etkisi

Necip Altay Eren [1]

[1]Gaziantep Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, İnşaat Bölümü, 27310, Gaziantep, Türkiye

Anahtar Kelimeler
Geopolimer
Nano-malzemeler
Termal davranış

Makale geçmişi:
Geliş Tarihi: 24.12.2022
Kabul Tarihi: 13.09.2023

Öz: Bu araştırma kapsamında geopolimer beton karışımında kullanılan nano-malzemeler ve bu malzemelerin geopolimer betonun termal davranışları üzerine etkileri konusunda yapılan çalışmalar incelenmiş ve özetlenmiştir**.** Geopolimer çevre dostu, ekonomik ve dayanıklı bir malzemedir. Son yıllarda, geopolimer betonun termal davranışları üzerinde yapılan çalışmalar artmaktadır. Yapılan çalışmalarda geopolimer betonun termal davranışlarını geliştirmek amacıyla geopolimer beton karışımlarda çeşitli nano-malzemeler kullanılmıştır. Bu nano-malzemelerin bazıları endüstriyel atık malzemesidir. Bu malzemeler geopolimer karışımlarda kullanıldığı için bu malzemelerin depolanma sorunu ve bu malzemelerden kaynaklı oluşacak çevre sorunlarının çözümüne katkı sağlamaktadır. Geopolimerde kullanılan nano-malzemenin türü, kullanım oranı, kürleme şartları, maruz kaldığı sıcaklık derecesi ve maruz kalma süresi geopolimerin termal davranışını etkilemektedir. Yapılan çalışmalarda genellikle kullanılan bu nano-malzemelerin geopolimer betonun termal davranışlarını geliştirdiği tespit edilmiştir.

Atıf için/To Cite: Eren N.A. Nano-malzemelerin Geopolimer Betonun Termal Davranışlarına Etkisi. Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi, 15(2), 80-94, 2023.

The Effects of nanomaterials on the thermal behavior of geopolymer concrete

Keywords
Geopolymer
Nano-materials
Thermal behaviour

Article history:
Received: 24.12.2022
Accepted: 13.09.2023

Abstract: Within the scope of this research, studies on nano-materials used in geopolymer concrete mixtures and their effects on the thermal behavior of geopolymer concrete are reviewed and summarized. Geopolymer is an environmentally friendly, economical and durable material. In recent years, studies on the thermal behavior of geopolymer concrete have been increasing. In these studies, various nano-materials were used in the geopolymer concrete matrix to improve the thermal behavior of geopolymer concrete. In addition, some of these nano-materials are industrial waste materials. Since these materials are used in geopolymer mixtures, it contributes to the solution of the storage problem of materials and environmental problems that may arise from these materials. The type of nano-material used in the geopolymer, its ratio, curing conditions, temperature and exposure time affect the thermal behavior of the geopolymer. In the studies conducted, it has been determined that these nano-materials generally improve the thermal behavior of geopolymer concrete.

1. Giriş

Beton, dünyada sudan sonra en çok kullanılan ikinci malzeme olup, inşaat sektöründe büyük miktarlarda ve her geçen gün daha fazla miktarda kullanılmaya devam edilmektedir [1]. Çimento üretim süreçlerinden biri de karbonun kalkerden ayrılmasıdır. Bu işlem nedeniyle havaya önemli miktarda sera gazı (CO_2 vb.) salınması, kirliliğin artmasına ve küresel ısınma sorununun artmasına neden olmaktadır. Emisyon analizleri, CO_2 salınımının artmasında çimento üretiminin (kalsinasyon yoluyla %54 ve yakıt tüketerek %46) önemli etkisi olduğunu göstermiştir [2]. Günümüzde sera gazı salınımı, çevre kirliliğinin en ciddi sebeplerinden biridir. Bu nedenle inşaat sektöründe çimento kullanımının azaltılması gerekmektedir. CO_2 salınımlarını azaltmak için inşaat sektöründe çevre dostu malzemelere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle yeni alternatif malzemeler araştırılmaktadır.

* İlgili yazar/Corresponding author: altayeren@gantep.edu.tr

Metakaolin, cüruf, uçucu kül ve alkali çözeltisi gibi zengin alümin silikat malzemelerden elde edilebilen çevre dostu bir beton olan Geopolimer beton inşaat sektörü için alternatif malzemelerden biridir. Geopolimer beton son yıllarda ilgi görmüş ve Portland çimentosuna bir alternatif olarak değerlendirilebilir [3,4,5]. Geopolimer kompozitlerin üretimi daha düşük karbon ayak izine sahiptir ve Portland çimentosu üretiminden daha az enerji kullanır. Son zamanlarda, kompozitin özelliklerini iyileştirilmiş performanslarla geliştirmek için geopolimer kompozitlere farklı tipte nano-malzemerin dahil edilmesi için çaba sarf edilmektedir. Nano-teknoloji, özellikle son yirmi yılda giderek dikkat çeken yeni bilim ve değerli uygulamalara sahip en aktif araştırma alanlarından biridir [6].

Geopolimerlerle ilgili makalelerin katlanarak artması, geopolimerlerin geleneksel çimentoya önemli bir alternatif olarak uygulanabilirliğinin daha iyi anlaşılmasını sağlamaktadır. Geopolimer, termal stabilite ve yangın direncinde gelişmiş performanslar sergilediği tespit edilen son teknoloji ürünü inorganik bir malzemedir.

Günümüzün önemli ekolojik sorunlarından biri de endüstriyel atık ürün malzemelerinin düzenli depolama, doğal kaynak tüketimi ile çevreye yük oluşturmakta ve çevre kirliliğini arttırmaktadır. Bu atık ürünlerin bazıları örneğin silika dumanı, uçucu kül ve cüruf gibi beton teknolojisi uygulamalarında yeniden kullanılabilir ve bu sayede çevre kirliliğinin azaltılmasında yardım eder ve atık sorunlarının yönetilmesine katkıda bulunur. Bazı endüstriyel yan ürünler, araştırmacılar tarafından çimentoya alternatif olarak kullanılmıştır [7]. Ayrıca bu yan ürünler betonun akışkanlığını, işlene bilirliğini ve mekanik özelliklerini iyileştirmek için kullanılır [8–11]. %100 öğütülmüş yüksek fırın cürufu ve uçucu külün betonun mekanik özellikleri, ekonomi ve çevre üzerinde olumlu etkileri vardır [12, 13].

Nano-teknoloji, inşaat mühendisliği alanında henüz başlangıç aşamasında olan yenilikçi ve gelişen bir bilim dalıdır. Nano-malzemeler kullanılarak geleneksel çimentolu betonun performansını artırmak için kapsamlı çalışmalar yapılmıştır. Yapılan araştırmalar, nano-malzemenin geopolimer betonun geopolimerizasyonu ve mikro yapıyı geliştirdiğini göstermiştir [14]. Sonuç olarak, olağanüstü özellikleri sayesinde betonun mikro yapısını iyileştirdiği, çimento betonunun taze ve sertleşmiş özelliklerini iyileştirdiği bilinen nano-malzemeler, çimentolu malzemelerde yaygın olarak kullanılmaktadır [15]. Nano-malzemelerin geopolimer beton karışımlarına dahil edilmesinin geopolimerizasyon reaksiyonu ve geopolimer betonun termal davranışları üzerindeki etkilerini anlamak için şimdiye kadar bazı çalışma yapılmıştır.

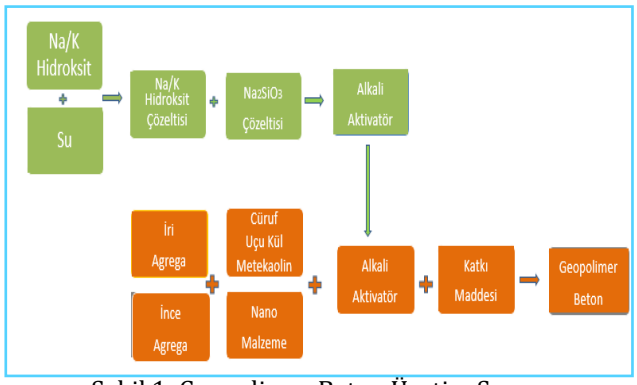
Günümüzde sera gazı salınımı, çevre kirliliğinin en ciddi sebeplerinden biridir. Çimento üretimi havaya önemli miktarda sera gazı (CO_2 vb.) salınması, kirliliğin artmasına ve küresel ısınma sorununu arttırmaktadır. Ayrıca, çevre kirliliğine neden olan bir diğer durumda saniyede yan ürün olarak ortaya çıkan malzemelerdir.

Bu çalışmada geopolimer betonun özelliklerini geliştirmek için kullanılan nano-malzemerin bazıları sanayiden elde edilen atık malzemeleridir. Bu malzemeler geopolimer beton karışımlarında kullanılarak hem geopolimer betonun geliştirilmesine hem de bu malzemelerin depolanma sorununa ve depolandığında çevreye vereceği zarar önlenmiş olacaktır. Bu makalenin amacı; çeşitli nano-malzemelerin geopolimer betonun termal davranışı üzerine etkilerini belirlemek için yapılan çalışmaların kapsamlı bir incelemesini sunmaktır.

2. Malzemeler

2.1 Geopolimer

Geopolimer, kovalent bağlarla bağlı mineral molekül ağları ile karakterize edilen inorganik seramik malzemelerdir**.** Geopolimer elde etmek için alüminosilikate ve aktif alkali bağlayıcıya ihtiyaç vardır. Silika ve alümina açısından zengindirler ve alkali çözelti ile reaksiyona girerler ve beton için bağlayıcı malzeme görevi gören alümin silikat jel üretirler. Aşağıdaki Şekil-1'de Geopolimer üretim prosedürü şema olarak verilmiştir.



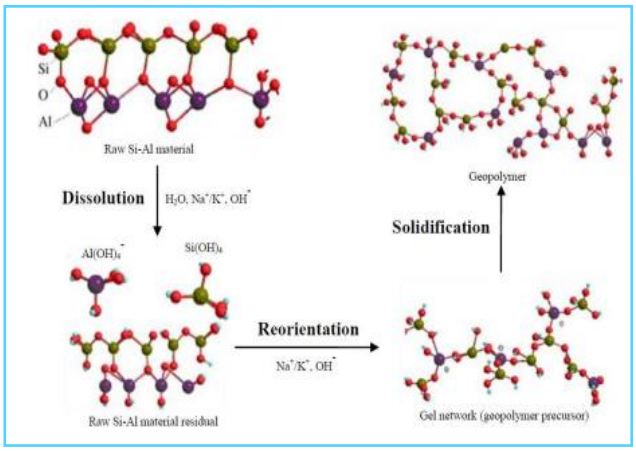
Şekil 1. Geopolimer Beton Üretim Şeması

2.2 Geopolimerizasyon Süreci

Polimerizasyon aslında Şekil-2'de görüldüğü gibi küçük moleküllerin büyük zincir şeklinde veya üç boyutlu makro moleküller ürettiği bir dizi kimyasal reaksiyondur. Aynı zamanda, tüm bu reaksiyonlar ekzotermiktir. Bazı araştırmacılara göre, bu malzeme

gerçekten de zeolittir, ancak geopolimer ve zeolitin ana ayırt edici özelliği moleküler yapılarıdır. Geopolimerler amorf veya yarı kristal moleküler yapıya sahipken, zeolitler ters kristal yapıya sahiptir ancak sentez yöntemleri aynıdır. Geopolimerizasyon üç ana adımda özetlenebilir [16]:

- Alkalin bir çözeltinin etkisi altında alümin silikatların çözeltisi
- Yeniden yönlendirme
- Katılaşma



Şekil-2 Tipik Geopolimerizasyonun şematik taslağı[17]

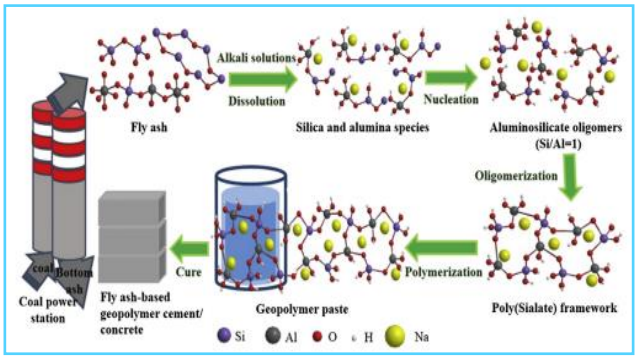
3. Bağlayıcılar

Geopolimer betonun termal davranışları üzerine yapılan çalışmalar incelendiğinde; alümin silikat kaynak malzemesi olarak Uçucu Kül, Cüruf ve Metakaolin kullanıldığı tespit edilmiştir.

3.1 Uçucu Kül

Uçucu kül, kömürlü termik santrallerin bacalarından gazlar ile kazandan dışarı atılan ince partiküllerden oluşan katı atık bir malzemedir. Yakılan kömürün kaynağına bağlı olarak, uçucu külün bileşenleri önemli ölçüde değişir. Genel olarak, uçucu külün bileşenleri tipik olarak amorf ve kristal oksitler veya çeşitli mineral formunda bulunan SiO_2, Al_2O_3, CaO ve Fe_2O_3'ü içerir. "American Society for Testing and Materials" standardı C618'e (ASTM C618-12a, 2012) göre uçucu kül, kalsiyum oksit içeriklerine göre C Sınıfı ve F Sınıfı olarak sınıflandırılabilir.

Şekil-3'te uçucu kül bazlı geopolimer betona geçiş sürecinin şematik gösterimi verilmektedir. Uçucu kül esaslı geopolimer beton iki malzemeden elde edilmektedir: Uçucu kül ve alkali aktivatör. Genel olarak, uçucu kül santralden elde edildiği gibi başka bir işleme gerek olmadan kullanılmaktadır. Karışımda alkali aktivatör olarak kullanılan sodyum silikat ve sodyum hidroksit çözeltileri sanayide üretilebilmektedir. Uçucu kül, bir alkali aktivatörün etkisi altında depolimerize olabilen çok sayıda amorf silika alüminyum yapılardan oluşur ve geopolimerler gibi belirli koşullar altında inorganik jel malzemeleri üretmek için kullanılabilir [18]. Ayrıca, uçucu kül bazlı geopolimerlerin hazırlanması ve uygulanması önemli ekonomik ve çevresel faydalara sahiptir. Uçucu kül, sentetik geopolimerler için bir hammadde olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Geopolimer betona, uçucu kül kullanıldığı zaman betonun yapısal dayanımını ve tekdüzeliğini önemli ölçüde arttır [19]. Geopolimerizasyon sırasında sodyum alümin silikat jeli üretmek için alkali çözelti uçucu küldeki SiO_2 ve Al_2O_3 ile reaksiyona girer [20,21].



Şekil-3 Uçucu kül bazlı geopolimer betona geçiş sürecinin şematik gösterimi [22]

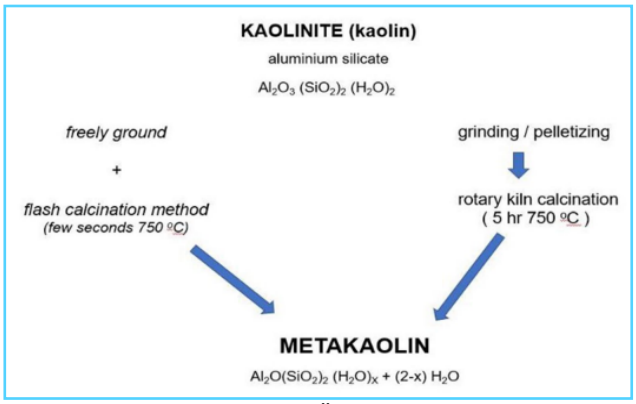
3.2 Cüruf

ASTM'ye göre, cüruf, demir fırında erimiş halde iken elde dilen bir yan üründür. Aynı zamanda, cüruf silikatlar ve kalsiyum gibi metalik olmayan bazların alümina silikatlarından oluşan bir ürün olarak tarif edilebilir. Yüksek fırın cürufu iki türdür: havada soğutulmuş yüksek fırın cürufu ve granüle yüksek fırın cürufu. Cüruf yüksek kalsiyuma sahiptir, çimento hidratasyonu sırasında meydana gelen benzer kalsiyum silikat hidrat jeli (C-S-H) oluşmaktadır. Cüruf esaslı geopolimer beton, çimento esaslı betona göre asit ve diğer kimyasallara daha dayanıklıdır. Bunun sebebi, cüruf esaslı geopolimer beton kür ve aktivatör şartlarına bağlı olarak, 1000-1200 °C sıcaklığa maruz kalsa bile içyapısında bozulmalar göstermemektedir [23]. Bundan dolayı, agrega genleşmesi az, sülfat, korozyon ve donma-çözülme dayanıklılığı yüksek geopolimerler üretmek mümkündür. Geopolimer betonlardaki Si:Al oranına bağlı olarak dayanımda ve elastik modülünde farklılıklar oluşmaktadır. Örneğin; basınç dayanımı 100 MPa varan veya 4 saatte oda sıcaklığında 20 MPa basınç dayanıma ulaşan örnekler vardır. Ayrıca, bazı geopolimer betonlar oda sıcaklığında priz alabilir ve dayanım kazanabilir. Ayrıca, geopolimer betonların çimentolu betonların basınç dayanımlarına ulaşabilmesi için literatürde birçok çalışma mevcuttur [23].

Kalsiyum içeriği az olan örneklerde geopolimer olarak tanımlanırken, yüksek kalsiyum içeriğine sahip cüruf gibi örnekler alkali aktive olarak tanımlanmaktadır. Ancak farklı türlerde metal cüruflar, asit çözeltileri veya farklı aktivatörler içeren geopolimerlerde vardır [23].

3.3 Metakaolin

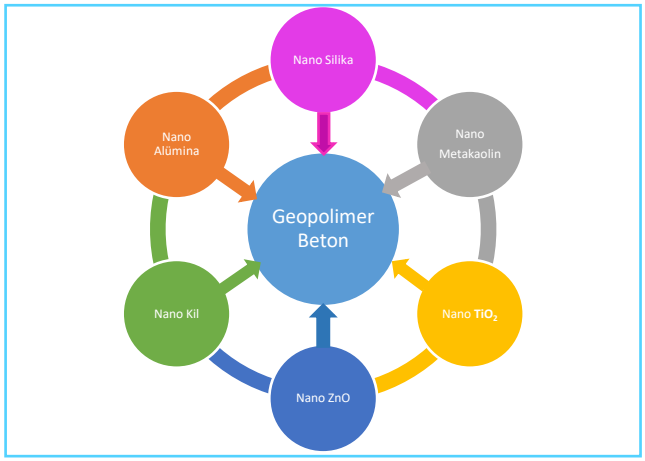
Şekil-4'te üretim şeması verilen Metakaolin kaolinden elde edilen ve betonda kullanılan çok etkili puzolanik ve bir tür susuz alüminosilikat malzemedir. Metakaolin, diğer tamamlayıcı çimentomsu malzemelerin aksine, endüstriyel bir yan ürün değildir. Doğal olarak oluşan minerallerden elde edilir ve renk, yüksek derecede saflık ile parçacık boyutu ve puzolanik reaktivite gibi fiziksel özelliklerini iyileştirmek için dikkatle kontrol edilen koşullar altında üretilir. Metakaolin, zengin bir Al_2O_3 kaynağıdır ve SiO_2, alkalin aktivatörlerle yüksek reaktivite gösterir ve bu nedenle geopolimerizasyon sürecini hızlandırır. Metakaolin bazlı geopolimerinin basınç dayanımı ve mikro yapısının gelişimi büyük ölçüde Si:Al ve Na:Al molar oranlarına bağlıdır [24-26]. Metakaolinin geopolimerizasyon reaksiyonu, farklı deneysel teknikler ile birçok araştırmada kullanılmıştır.



Şekil-4 Metakaolin Üretim Şeması [27]

4. Nano-Malzemeler

Nano teknolojik malzemelerin betonun özelliklerini önemli ölçüde artırması inşaat sektörünü geliştirmiştir. Ultra ince parçacık boyutlarından dolayı nano-malzemeler benzersizdir ve fiziksel ve kimyasal özellikleri ile dikkatleri üzerine çekmiştir. Nano-partiküller, homojen bir şekilde dağılma yeteneklerinden dolayı bağlayıcı harcın mikro yapısını ve mukavemet özelliklerini iyileştirir. Şekil-5'te gösterildiği gibi Nano-silika (nano-SiO_2), nano-alümina (nano-Al_2O_3), nano-titanyum dioksit (nano-TiO_2), nano-ZnO ve nano-kil genellikle geleneksel çimento betonunda performans artırıcı olarak kullanılır. Genel olarak, nano-malzeme içeren betonlar, nano-malzeme içermeyen betonlara göre kıyasla önemli ölçüde daha iyi dayanım özellikleri gösterir. Özelliklerdeki iyileşmenin nedenleri şunlar olabilir: nano-parçacıklar mükemmel bir dolgu maddesi olarak işlev gördüğünden, beton matris yapısını nano düzeyde manipüle ederler ve daha yoğun bir yapıya sahip mikro yapılar oluşmasına neden olurlar. Yapılan araştırmalar incelendiğinde; alümin silikat kaynak malzemelerinin bileşimi ve çeşitli çalışmalarda kullanılan nano-malzemelerin kimyasal birleşenleri Tablo-1'de, incelenen çalışmalarda kullanılan veriler ve elde edilen termal davranış sonuçları Tablo-2'de verilmiştir.



Şekil-5 Termal Kararlılık İçin Geopolimer Karışımlarda Kullalılan Nano-Malzemeler

4.1 Nano-Silika

Nano-silika, reaktif puzolanlar ve gözenek doldurma etkisi nedeniyle betonun özelliklerini iyileştirmek için yaygın geopolimerlerde en yaygın kullanılan nano-malzemedir [41, 42]. Kristal ve amorf formlarda silikon dioksitten (SiO_2) oluşur. Nano silika parçacıklarının boyutu, çeşitli silika bazlı nanomalzeme ürünleri türleri için 5–658 nm arasında değişmektedir [43, 44]. Nanosilika ilavesi sadece polimerizasyon reaksiyonunu hızlandırmakla kalmaz, aynı zamanda doğal puzolan bazlı polimerlerde kalsiyum silikat hidratların (C-S-H) ve sodyum alüminosilikat hidratların (N-A-S-H) gelişimini de destekler [45]. H.M. Khater, Alaa M. Rashad, Kang Gao, Z. Zidi, M.F. Zawrah ve T. Revathi yaptıkları çalışmalarda; geopolimer karışıma belirli miktarda nano-silika eklenmesi, nano-silika karışımın gözenek yapısını azaldığı için karışımın termal davranışı üzerinde olumlu etkileri olduğunu tespit edilmiştir [28-33].

4.2 Nano-Kil

Nano-killer, katmanlı mineral silikatların nano-parçacıklarıdır. Kimyasal bileşime ve nanoparçacık morfolojisine bağlı olarak, nano-killer montmorillonit, bentonit, kaolinit, hektorit ve halloysit gibi birkaç sınıfa ayrılır.
Nano-malzemeler, polimerizasyon işleminin yoğunluğunu ve hidrasyonunu artırarak geopolimer

matrislerindeki hibrit uçucu kül/cürufun basınç mukavemetini geliştirir. Nano-kil, kontrol karışımından daha düşük gözenekliliğe ve su içeriğine sahip daha yoğun bir karışım üretir. Araştırmacılar Nano-kil parçacıklarının bağlayıcı taneler ile kullanımını ve puzolanik reaksiyona etkisini incelediler. Nano-kil, yüksek yüzey alanı/hacim oranı ve dikkate değer kimyasal reaktivite gösterme kapasitesi nedeniyle çimento matrisinin boyutunu ve gözenekliliğini azaltarak mekanik performansı artırır. Geopolimer matrisine nano-kil ilavesi polimerizasyonu artırabilir. Optimum nano-kil içeriği, artan polimerizasyonla sonuçlanırken, daha fazla nano-kil konsantrasyonu, daha fazla gelişme olmaksızın aktif olmayan bir duruma neden olur. Yapılan araştırmalar; geopolimer betonda nano-kilin mikro-dağılımdan dolayı polimerizasyona olumlu katkı sağladığı sonucuna varıldı [46]. H.Assaedi'nin ve H.M.Khater'ın yaptıkları çalışmalarda; nano kilin geopolimer betona eklenmesinin geopolimer betonun mekanik ve termal özelliklerini iyileştirdiğini gösterdi [34,35].

4.3 Nano-ZnO

Karışıma nano-ZnO kullanılması, iyi sıkıştırılmış geopolimer beton üretmek için kullanılır. Aynı zamanda düşük maliyeti ve geniş uygulama yelpazesinin yanı sıra birçok polimeri iyileştirme etkisine sahiptir [46, 47]. Seramik uygulamalarında faydalı olan, ZnO yüksek ısı kapasitesi, düşük ısıl genleşmesi ve yüksek erime sıcaklığı özelliklerine sahiptir. Nano-çinko'nun geopolimer matrise eklenmesi, geopolimer matrisinin homojenliğini arttır. Geopolimerde az miktarda nano-çinko eklemek uygundur, çünkü elde edilen kompozitler, sıradan betonun basınç dayanımına hemen hemen eşdeğer bir basınç dayanımına sahiptir [48-50]. Z.Zidi'nin ve YaChaoWang'un yapmış oldukları çalışmalarda; nano-ZnO'nun belli oranda kullanıldığında geopolimer betonun termal davranışı üzerine pozitif katkısı olduğu sonucuna ulaşılmıştır [35,36].

4.4 Nano-TiO_2

Nano-TiO_2, Portland çimentosunun erken yaş hidratasyonunu hızlandırır, basınç dayanımını ve eğilme dayanımını iyileştirir ve betonda aşınma direncini arttırır. Nano-TiO_2'nin karışıma dâhil edilmesi, geopolimer betonun mikro yapısını geliştirir ve daha az kırılmaya neden olur. Ayrıca, Nano-TiO_2 karbonatlaşma direncini arttırır iken, büzülmeyi azaltır. Aynı zamanda, Nano-TiO_2 basınç dayanımını pozitif etkilemektedir [52, 53]. M. Sivasakth'nin yaptığı çalışmada; nano-TiO_2'nın geopolimer beton karışımların termal davranışlarını olumlu etkilediği sonucuna ulaşılmıştır [38].

4.5 Nano-Alümina (Nano-Al_2O_3)

Alümina, yüksek sertlik, yüksek stabilite, yüksek yalıtım ve şeffaflık özelliklerine sahiptir [54]**.** Nano-Al_2O_3, bir alümina kütlesinden nano boyutlu küresel parçacıklardır. Alümina nanopartiküller, piroliz, püskürtme, sol jel ve en yaygın olarak tercih edilen teknik lazer ablasyonu dahil olmak üzere çeşitli yöntemlerle elde edilebilir [55]. Nano-alümina yüksek saflıkta ve daha yüksek incelikte, çimento-kum arasındaki yüzey geçiş bölgesini ve matristeki kılcallığı doldurarak betonun mekanik özelliklerini geliştirir [56-59] ve böylece bağlayıcı malzemenin özelliklerini iyileştirir. Z.Zidi'nin çalışmasında; geopolimer karışıma nano-Al_2O_3 eklenmesi geopolimer'in mikro yapısını geliştirdiği için, karışımın termal davranışını geliştirdiği sonucuna varmıştır [39].

4.6 Nano-Metakaolin

Metakaolin kaolinden elde edilen kaolinin bir türevidir. Kaolin 600°C ile 800°C arasındaki sıcaklıklarda ısıtılır [61] ve kaolin dehidroksilasyondan sonra, oktahedral alüminanın çoğu daha aktif tetra koordineli ve penta koordineli birimlere dönüştürülür [62]. Kristal yapı tamamen veya kısmen kırıldığında veya kaolinit tabakaları arasındaki bağlar koptuğunda faz değişimli metakaolin oluşur [63-67]. Nano-metakaolin, oluşan metakaolinleri nano boyutlar elde edilinceye kadar öğütülmesiyle elde edilir. El NagarAM'ın yapmış olduğu çalışmada; geopolimer matrisde nano-metakaolin kullanılması, matrisin termal davranışını geliştirdiği sonucuna varılmıştır [40].

5. Termal Davranış

Mevcut literatürün gözden geçirilmesinden anlaşıldığı üzere genel olarak Geopolimer betonda nano-malzemelerin kullanılması termal davranışa olumlu katkıları olduğu anlaşılmaktadır. Bu çalışma kapsamında incelenen nano-malzemeler; nano-silika, nano-kil, nano-ZnO, nano-TiO_2, nano-alümina ve nano-metakaolindir. İncelenen çalışmalardan elde edilen veriler Tablo-2'de verilmiştir.

H.M. Khater ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada metakaolinli geopolimer betonlarda %0, %1, %3, %5 ve %7 oranlarında nano-silika dumanı kullanılmış ve bu numuneler 25°C, 500°C, 700°C, 800°C ve 1000°C'de basınç dayanım ve termo-gravimetrik analiz testleri yapılmıştır. Yapılan basınç testleri sonucunda en yüksek basınç dayanımı 700°C'de %5 nano-silika dumanı içeren karışımda sırasıyla yaklaşık 43.1, 46.4, 48.6, 40.9 ve 36 MPa, en düşük basınç dayanımını da 25°C'de sırasıyla yaklaşık 17.8, 20.6, 31.6 32.2 ve 32.9 MPa olarak elde edilmiştir. Yapılan termo-gravimetrik analiz sonucunda kütle kaybı 25°C, 500°C, 700°C, 800°C ve 1000°C için sırasıyla %5.63, %2.09, %1.29, %0.86 ve %0.55 olarak gerçekleşmiştir. Sonuçlar, nano-silika

dumunı'nın metakaolinli geopolimerlerin fizikomekanik özellikleri üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. En iyi sonuç 700°C 'de %5 nano-silika dumanı içeren karışımda elde edilmiştir. Bunun nedeni; nano-malzemenin matrisin mikro yapısını güçlendirdiği için termal davranışı iyileştirmiştir

Alaa M. Rashad ve arkadaşlarının yaptığı araştırmada metakaolinli geopolimer betonlara %0.5, %1, %2, %3 ve %4 oranlarında nano-silika ilave edilmiş ve bu numuneler 400°C, 600°C, 800°C ve 1000°C'de basınç dayanım ve termo-gravimetrik analiz testleri yapılmıştır. Yapılan testler sonucunda en yüksek basınç dayanımı %0.5 nano-silikalı karışımlardan elde edilmiştir ve yaklaşık sırasıyla 95.6, 101, 111 ve 126 MPa olarak elde edilmiştir. Yapılan termo-gravimetrik analiz sonucunda sırasıyla %2.66, %1.21, %0.78 ve %0.58 kütle kayıpları olmuştur. Yapılan testler sonucunda, %0.5 nano-silika'nin karışıma dahil edilmesi, metakaolin bazlı geopolimerin basınç dayanımını ve yangın direncini arttırırken, ekstra miktarlarda nano-silika'nın dahil edilmesi olumsuz etkilerin ortaya çıkmasına neden olmuştur. Bunun nedeni; nano-silikanın matrisdeki boşluk yapısını azaltmasıdır.

Kang Gao ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada metakaolin bazlı geopolimerde katı/sıvı oranı 0.97, 1.03, 1.10 ve 1.19 olan karışımlara %1, %2 ve %3 oranlarında nano-silika eklenerek 1, 28 ve 60 günlük kürleme zamanlarında eğilme dayanımın testi yapılmış ve ayrıca 50°C, 350°C, 550°C ve 690°C'de termo-gravimetrik analiz testi yapılmış. Yapılan eğilme testi sonucunda en yüksek değer %1 nano-silikalı ve katı/sıvı oranının 1.03 olduğu karışımda elde edilmiştir. Yapılan termo-gravimetrik analiz sonucunda en az kütle kaybı katı/sıvı oranının 1.19, 28 günlük kürleme ve %1 oranında nano-silika içeren karışımda elde edilmiştir. Bunun nedeni, nano-SiO_2 geopolimer matriste boşluk yapısını azaltmasıdır.

Z.Zidi ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada sıvı/katı oranı 0.55 ve 10 M NaOH çözeltili metakaolin bazlı geopolimere %1, %2, %3, %5, %7 ve %10 oranlarında nano-silika kullanarak 30°C, 200°C, 550°C ve 450°C'de termo-gravimetrik analiz testi ve 30°C'de numunelere basınç dayanımı testi yapılmıştır. Yapılan testlerde en yüksek basınç dayanımı ve en az kütle kaybı 100°C'ye kadar %5 nano-silika içeren karışımdan elde edilmiştir. Bunun sebebi, gözenek yapısındaki iyileşmedir.

M.F. Zawrah ve arkadaşlarını yaptığı çalışmada metakaolin bazlı geopolimere %2.5, %5 ve %7.5 oranlarında nano-silika ekleyerek 800°C ve 1000°C'de basınç dayanım ve termo-gravimetrik analiz testleri yapılmıştır. Yapılan basınç dayanımı testi sonucunda 800°C'de %2.5, %5 ve %7.5 oranları için sırasıyla 55.6, 25.2 ve 23.5 MPa değerleri elde edilirken 1000°C için sırasıyla 95.6, 43.92 ve 40 MPa değerleri elde edilmiştir. %2.5 nano-silika karışımı için yapılan termo-gravimetrik analiz sonucunda 1000°C'de kütle kaybı toplam %13.61 olarak bulunmuştur. Yapılan testler sonucunda en yüksek basınç dayanımı ve en az kütle kaybı %2.5 nano-silikalı karışımda elde edilmiştir. %2.5' tan fazla nano-silika kullanılması topaklaşmaya neden olduğu için en olumlu sonuçlar %2.5 oranında elde edilmiştir. Karışımda %2.5'den fazla nano-silika kullanılması topaklaşmaya sebep olduğu için negatif etkilemektedir.

T.Revathi ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada uçucu kül ve cüruf bazlı geopolimere %0.5, %1, %1.5, %2, %2.5 ve %3 oranlarında nano-silika kullanılarak 200°C, 400°C, 600°C ve 800°C'de basınç dayanım ve termo-gravimetrik analiz testleri yapılmıştır. Yapılan basınç testi sonucunda en yüksek değerler 200°C'de %2 nano-silikalı karışımdan yaklaşık 55MPa olarak elde edilmiştir. Termo-gravimetrik analiz sonuçlarına göre %2.5'luk nano-silika içeren karışımda 1000 °C'de kütle kaybı %8.45'tir. Nano-silika'nın %2.5 dan fazla kullanılması karışımda homojen dağılma sorunu oluşturmaktadır.

H.Assaedi ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada uçucu kül bazlı geopolimere %1, %2 ve %3 oranlarında nano-kil kullanılarak 100°C, 200°C, 300°C, 400°C, 500°C, 600°C, 700°C ve 800°C'de basınç dayanım ve termo-gravimetrik analiz testleri yapılmıştır. Yapılan basınç dayanımı testi 20°C'de %2 nano-kil içeren karışımda 45.9MPa olarak bulunmuştur. Termo-gravimetrik analiz testlerine göre en az kütle kaybı %2 oranına sahip numunede 800°C'de %11.6, en fazla kütle kaybı nano-kil içermeyen karışımda % 28.5 oranında gerçekleşmiştir. Bunun nedeni; nano-kilin hem mikro yapıyı iyleştirmesi, hem de geopolimerik reaksiyonu kolaylaştırmasıdır

Z.Zidi ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada metakaolin bazlı geopolimerde %0.3, %0.5 ve %0.7 oranlarında nano-ZnO kullanılarak 100°C, 200°C, 300°C, 400°C ve 500°C'de basınç dayanım ve termo-gravimetrik analiz testleri yapılmıştır. Yapılan çalışmada geopolimer karışıma az miktarda %0.5 eklenmesi basınç dayanımını üzerinde olumlu etkileri olduğu sonucuna varılmıştır. Yapılan termo-gravimetrik analiz göre 70°C'ye kadar %2, 200°C'de yaklaşık %5.5 ve 450°C'de yaklaşık %4 oranında kütle kaybı gerçekleşmiştir. Yapılan çalışma sonucunda nano-ZnO'nun kullanılması termal kararlılık üzerinde olumlu etkisi olduğu sonucuna varılmıştır. Bunun

sebebi; nano-ZnO geopolimer matris ve nanopartiküller arasındaki bağı güçlendirmesidir.

YaChaoWang ve arkadaşları yapmış olduğu çalışmada metakaolin bazlı geopolimer karışımlarda %0.19, %0.47, %0.76 ve %1.4 oranlarında nano-ZnO kullanarak 200°C, 400°C, 600°C, 800°C ve 1000°C'de termo-gravimetrik analiz testleri yapılmıştır. Yapılan testler sonucunda, nano-ZnO' nun %0.47 oranında kullanıldığında en iyi termal performansı göstermektedir. Bunun sebebi, ZnO seramik benzeri Si/C/P oluşumuna neden olmasıdır.

M.Sivasakth ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada uçucu kül bazlı geopolimere %2 oranında nano-TiO_2 ekleyerek 200°C, 400°C, 600°C ve 800°C'de basınç dayanımı ve termo-gravimetrik analiz testleri yapılmıştır. Yapılan 7 ve 14 günlük basınç dayanım testleri sonucunda %2 oranında nano-TiO_2 içeren karışım tüm sıcaklıklar da en yüksek değerlerini vermiştir. 14 günlük basınç dayanımları 20MPa, 30MPa, 26MPa, 23MPa ve 28MPa'dır. En yüksek basınç dayanımı 200°C'de 30MPa olarak bulunmuştur. Yapılan termo-gravimetrik analizi sonucunda maksimum kütle kaybı 800°C'de nano-TiO_2'siz karışımda %12, minimum kütle kaybı 200°C'de %2 nano-TiO_2'li karışımda %4 olmuştur. Yapılan testler %2 nano-TiO_2 kullanıldığında en iyi termal davranış sonucunu vermiştir. Bunun nedeni; nano-TiO_2 matrisdeki boşlukları doldurmasıdır.

Z.Zidi ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada metakaolin bazlı geopolimer karışımlara %1, %2 ve %3 oranlarında nano-alumina ekleyerek 100°C, 200°C, 300°C ve 450°C'de termo-gravimetrik analiz ve basınç dayanımı testleri yapılmıştır. Yapılan basınç dayanımı testlerine göre en yüksek değer %2'lik nano-alumina içeren karışımdan 39MPa, en düşük değer ise nano-aluminasız karışımdan 30MPa olarak elde edilmiştir. Yapılan termo-gravimetrik analiz sonucunda yaklaşık 130°C' ye kadar %2'lik nano-alumina içeren karışım için kütle kaybı yaklaşık %4 olmuş, kütle kaybını azaltmıştır. Ancak, 130°C'den sonra kütle kaybı nano-alümina içermeyen karışıma göre kütle kaybı daha fazla gerçekleşmiştir. Bunun nedeni; nano-alümina geopolimerin gel yapısını geliştirdiği ve daha homojen bir yapı oluşmasına neden olmuştur. Yapılan çalışma sonucunda nano- alümina'nın optimum oranı %2 olarak belirlenmiştir.

El.NagarAM ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada %50, %20 ve %0 kaolin, ve %50, %80 ve %100 cüruf bazlı geopolimer karışımlara %3 nano-metakaolin ekleyerek 300°C, 500°C, 600°C, 800°C ve 1000°C'de basınç dayanım ve termo-gravimetrik analiz testleri yapılmıştır. Yapılan basınç dayanımı testlerinde en yüksek değer 500°C'de %100 cüruf bazlı geopolimer karışımdan elde edilirken, en düşük değer %50 kaolin %50 cüruf içeren karışımlardan elde edilmiştir. Yapılan termo-gravimetrik analizlerde en az kütle kaybı %100 cüruflu karışımdan 0°C, 500°C ve 1000°C için sırasıyla %11.68, %3.30 ve %0.81 olmuştur. Bu sonuç, geopolimer aktivasyonunu artıran ve böylece reaksiyon verimini artıran cüruftaki camsı bileşen ile ilgilidir.

İncelemeler sonucunda geopolimer karışımlarda kullanılan nano-malzemenin türü, oranı, kürleme şartları, maruz kaldığı sıcaklık derecesi ve maruz kalma süresi geopolimerin termal davranışları üzerinde olumlu ya da olumsuz etkilere sahiptir. Kütle kaybı ilk başta geopolimer jeldeki ve karışımdaki yapısal suyun buharlaşmasından kaynaklanmaktadır [31]. Daha fazla artan sıcaklık büzülmeye neden olur ve sonunda geopolimer yapıya zarar verir [70].

6. Sonuçlar

Son zamanlarda araştırmalar, nano-malzemeler içeren geopolimerin davranışını anlamaya odaklanmıştır. Bu çalışma, geopolimer betonlarda kullanılan nano-malzemelerin termal davranış özelliğine etkisi ile ilgili yayınlanan makalelerin kapsamlı bir incelemesini sunmaktadır. Geopolimer beton içinde kullanılan nano-malzemeler geopolimer üzerinde olumlu etkileri olmaktadır. Ayrıca, alkali gibi aktivatörler ve kürleme rejimi, geopolimer özelliklerinde önemli rol oynar. Yayınlanan araştırmalar incelendiğinde, aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilir:

I. Nano-silika kullanılarak yapılan çalışmalarda en iyi termal davranışın elde edildiği oranlar %5, %2.5, %1 ve %0.5'dir. Nano-silika matrisin boşluk yapısını azaltmaktadır. Bu nedenle, geopolimer betonun termal kararlılığını artırmaktadır.

II. Nano-ZnO içeren karışımlar ile yapılan çalışmalarda %0.47 ve %0.5 oranlarda en iyi termal davranış göstermiştir. Nano-ZnO karışımda kullanılan malzemelerin arasındaki etkileşimi arttırmaktadır. Bundan dolayı, geopolimer betonun termal kararlılığına olumlu etkilemektedir.

III. Nano-kil kullanılarak yapılan çalışmada en iyi termal davranış %2 oranındaki karışımda elde edilmiştir. Nano-kil karışımın amorf yapısını ve geopolimerizasyonun artmasına neden olur. Bu nedenle, geopolimer matrisin boşluk yapısının azalmasına sebep olur. Böylece geopolimer betonun termal kararlılığının artmasına sebep olur.

IV. Nano-TiO_2 ile yapılan çalışmada %2'lik nano-TiO_2 içeren numuneden elde edilmiştir. Nano-TiO_2 matrisdeki boşluk yapısını azalttığı için geopolimer betonun termal kararlılığının artmasına neden olmaktadır.

V. Nano-alümina içeren karışım için yapılan çalışmada en iyi termal sonuçlar %2'lik nano-alümina içeren karışımdan elde edilmiştir. Nano-alümina karışımın boşluk yapısını azalttığı için geopolimer betonun termal kararlılığı artmaktadır.

VI. Nano-metakaolin kullanılarak yapılan çalışmada en iyi termal davranış sonuçları %3 nano-metakaolin içeren numunelerde elde edilmiştir. Nano-metakaolin karışımındaki boşlukları doldurduğu için termal davranışı olumlu etkilemektedir.

VII. Kullanılan nano-malzemeler yetersiz çözünme ve malzemelerin olası topaklaşması nedeniyle geopolimerin daha düşük bir polikondenzasyon seviyesine yol açar, bu da malzemenin termal davranışı üzerinde olumsuz etkilere sebep olur.

VIII. Nano-malzemelerin çok ince puzolanik malzemeler olduğu için, daha yüksek hidrasyon derecesi elde etmek için son derece yüksek reaktiviteleri sayesinde geopolimerin termal davranışını geliştirebilir.

IX. Nano-malzeme içeren geopolimerler, sıkıştırılmış ve daha homojen bir mikro yapı sergilemiştir. Ayrıca, nano-malzemelerin geopolimerlere katılmasıyla geopolimerizasyon oranı artmıştır.

X. Kullanılan nano-malzemelerin bazıları yan ürün olarak üretilen endüstriyel atık malzemeleridir. Geopolimer, bu atık malzemelerin yönetimi için iyi bir çözüm sunmaktadır.

Tablo 1. Alüminosilikat kaynak malzemelerinin bileşimi ve çeşitli çalışmalarda kullanılan nano-malzemeler

Referaslar	Malzeme	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	MnO	K_2O	Na_2O	P_2O_5	TiO_2	SO_3	BaO	ZnO	ZrO_2
H.M. Khater ve arkadaşları [28]	Metakaolin	62.37	31.6	1.47	0.26	0.01		0.15	0.12	0.01	2.6	0.01			
	Nano Silika														
A M. Rashad ve arkadaşları [29]	Metakaolin	58.52	35.54	1.15	1.24	0.19		0.05	0.25			0.06			
	Nano-Silika	98.6	0.01	0.01	0.01			0.045	0.21			0.46			
Kang Gao ve arkadaşları [30]	Metakaolin	54.6	38	1.3	0.24			0.32	0.04			0.04			
	Nano-Silika														
Z. Zidi ve arkadaşları [31]	Metakaolin	54.66	22.27	11.44	1.1			2.66	0.26						
	Nano-Silika														
M.F. Zawrah ve arkadaşları [32]	Metakaolin	56.03	38.81	0.538	0.098					3.039	0.156	0.012			0.34
	Nano-Silika	98.8	0.44	0.04	0.26					0.03	0.04	0.1			0.01
T. Revathi ve arkadaşları [33]	Uçucu Kül	47.55	33.45	8.17	2.099	0.505		1.65	0.015						
	Cüruf	21.6	14.9	1.78	55.3	2.6		0.48	0.05						
	Nano-Silika	98.78	0.453	0.007	0.087			0.04	0.38						
H. Assaedi ve arkadaşları [34]	Uçu Kül	63.13	24.88	3.07	2.58	0.61	0.05	2.01	0.71	0.17	0.96	0.18	0.07		
	Nano-Kil														
H. M. Khater ve arkadaşları [35]	Cüruf	36.95	10.01	1.48	33.07	6.43	3.52	0.74	1.39	0.1	0.52	3.52			
	Nano-Kil														
Z. Zidi ve arkadaşları [36]	Metakaolin	54.6	22.27	11.44	1.1	2.27		2.66	0.26			0.19			
	Nano-ZnO	51.56	18.64						5.58					0.04	
YaChaoWang ve arkadaşları [37]	Metakaolin														
	Nano-ZnO														
M. Sivasakth ve arkadaşları [38]	Uçu Kül	55	26	10.17	2.09	0.8		1.65	0.4						
	Nano-TiO_2														
Z. Zidi ve arkadaşları [39]	Metakaolin	54.6	22.27	11.44	1.1	2.27		2.66	0.26			0.19		0.01	
	Nano-Alümina														
El NagarAM ve arkadaşları [40]	Cüruf	36.59	10.01	1.48	33.07	6.53	3.44	0.74	1.39	0.1	0.52	3.52			
	Kaolin	49.86	34.1	0.3	0.09	0.26	0.01	0.02	0.03	0.35	0.88	0.59			
	Nano-Metakaolin	56.14	38.21	0.38	0.07	0.37	0	0	0.02	0.26	1.14	0.18			

Tablo 2. İncelenen çalışmarda kullanılan veriler ve elde edilen termal davranış sonuçları

Referanslar	Bağlayıcı	Nanomalzeme		Sıcaklık- °C	Kullanılan Method	Termal Davranış Bulguları
		Tür	Oran			
H.M. Khater ve arkadaşları [28]	Metakaolin	Nano Silika Dumanı	%1 %3 %5 %7	500-700-800-1000	Termogravimetrik Analiz Basınç Dayanımı Testi	Yapılan testler sonucunda %5 nano-silika dumanlı numune en iyi termal davranış göstermiştir. Bunun nedeni; nano-malzemenin matrisin mikro yapısını güçlendirdiği için termal davranışı iyileştirmiştir.
Alaa M. Rashad ve arkadaşları [29]	Metakaolin	Nano Silika	%0.5 %1 %2 %3 %4	400-1000		Yapılan testler %0.5 nano-silika kullanıldığında en iyi termal davranış sonucunu vermiştir. Bunun nedeni; nanosilikanın matrisdeki boşluk yapısını azaltmasıdır.
Kang Gao ve arkadaşları [30]	Metakaolin	Nano Silika	%1 %2 %3	50-700	Termogravimetrik Analiz	Yapılan çalışmada, karışımda nano-silikanın %1 oranında kullanılması en iyi termal davranışı göstermektedir. Bunun nedeni, nano-SiO_2 geopolimer matriste boşluk yapısını azaltmasıdır.
Z. Zidi ve arkadaşları [31]	Metakaolin	Nano Silika	%5	0-500	Termogravimetrik Analiz	Yapılan testler sonucunda, en yüksek termal kararlılık karışımda %5 nano-silika içerenlerde göründü. Bunun sebebi, gözenek yapısındaki iyileşme nedeniyledir.
M.F. Zawrah ve arkadaşları [32]	Metakaolin	Nano Silika	%2.5 %5 %7.5	0-1000	Termogravimetrik Analiz	Yapılan araştırma sonucunda; en iyi termal kararlılık %2.5 nano-silika kullanılması sonucunda elde edilmiştir. Karışımda %2.5'dan fazla nano-silika kullanılması topaklaşmaya sebep olduğu için negatif etkilemektedir.
T. Revathi ve arkadaşları [33]	Uçucu Kül Cüruf	Nano Silika	%0.5 %1 %1.5 %2 %2.5 %3	0-900	Termogravimetrik Analiz	Yapılan araştırma sonucunda; en iyi termal kararlılık %2.5 nano-silika kullanılması sonucunda elde edilmiştir. Nano-silika'nın %2.5 dan fazla kullanılması karışımda dağılma sorunu oluşturmaktadır.
H. Assaedi ve arkadaşları [34]	Uçu Kül	Nano Kil	%1 %2 %3	100-800	Termogravimetrik Analiz	Yapılan testler sonucunda nano-kilin %2 kullanımında en iyi termal davranış gözlemlenmiştir. Bunun nedeni; nano-kilin hem mikro yapıyı iyleştirmesi, hem de geopolimerik reaksiyonu kolaylaştırmasıdır.
H.M.Khater ve arkadaşları [35]	Cüruf	Nano Kil	%0.5 %1 %1.5 %3 %5 %7	0-800	Isıl İletkenlik	Yapılan çalışma; geopolimer nano-kil'in %1-1.5 oranında kullanılması termal özellikleri iyileştirdiğini göstermiştir. Bunun nedeninin nano-kilin geopolimerin mikro yapısını geliştirmesidir.

Z. Zidi ve arkadaşları [36]	Metakaolin	Nano ZnO	%0.3 %0.5 %0.7	25-450 70-200	Termogravimetrik Analiz	Yapılan testler %0.5 nano-çinko kullanıldığında en iyi termal davranış sonucunu vermiştir. Bunun sebebi; nano-çinko geopolimer matris ve nanopartiküller arasındaki bağı güçlendirmesidir.
YaChaoWang ve arkadaşları [37]	Metakaolin	Nano ZnO	%0.19 %0.47 %0.76 %1.1	70-1000	Termogravimetrik Analiz	Sonuçlar, nano-ZnO' nun %0.47 oranında kullanıldığında en iyi termal performansı göstermektedir. Bunun sebebi, ZnO seramik benzeri Si/C/P oluşumuna neden olmasıdır.
M. Sivasakth ve arkadaşları [38]	Uçu Kül	Nano TiO_2	%2	30-1200	Termogravimetrik Analiz	Yapılan testler %2 nano-TiO_2 kullanıldığında en iyi termal davranış sonucunu vermiştir. Bunun nedeni; nano-TiO_2 matrisdeki boşlukları doldurmasıdır.
Z. Zidi ve arkadaşları [39]	Metakaolin	Nano Alümina	%1 %2 %3 %5 %7 %10	25-450	Termogravimetrik Analiz	Yapılan çalışma sonucunda, nano-alüminanın kullanılması 150°C'ye kadar kütle kaybını azaltmış, ancak 150°C'den sonra kütle kaybını arttırmıştır.
El NagarAM ve arkadaşları [40]	Cüruf Kaolin	Nano Metakaolin	%3	0-1000	Termogravimetrik Analiz	Yapılan çalışma sonucunda; nano-metakaolin'li %50 cüruf, %50 kaolin olan karışım en düşük termal davranış göstermiştir. Bu sonuç, geopolimer aktivasyonunu artıran ve böylece reaksiyon ürününün verimini artıran cüruftaki camsı bileşen ile ilgilidir.

Kaynaklar

[1] Javeed M.A., Kumar M.V., Narendra H. Studies on Mix Design of Sustainable Geo-Polymer Concrete. *International Journal of Innovative Research in Engineering & Management (IJIREM)*. ISSN: 2350-0557, Volume-2, Issue-4, 2015.

[2] Karthik, A; Sudalaimani, K; Kumar V., C.T. Investigation on mechanical properties of fly ash-ground granulated blast furnace slag based self curing bio-geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, Volume: 149, pages 338-349, 2017.

[3] Bernal S.A., Rodrı´guez E.D., Gutie´rrez R.M., Gordillo M., Provis J.L. Mechanical and thermal characterisation of geopolymers based on silicate-activated metakaolin/slag blends. *Journal of Materials Science,* volume 46, pages5477–5486, 2011.

[4] Davidovits J. Geopolymers and geopolymeric materials. *Journal of thermal analysis* volume 35, pages429–441, 1989.

[5] Duxson P., Provis J.L., Lukey G.C., van Deventer J.S.J. The role of inorganic polymer technology in the development of 'green concrete'. *Cement and Concrete Research*, 37 1590–1597, 2007.

[6] Hemn U. A., Azad A. M., Ahmed S. M. The role of nanomaterials in geopolymer concrete composites: A state-of-the-art review. *Journal of Building Engineering, Volume 49, 15 May 2022.* https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104062

[7] Ahmed M.F., Nuruddin M.F., Shafiq N. Compressive Strength and Workability Characteristics of Low-Calcium Fly ash-based Self-Compacting Geopolymer Concrete. *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Civil and Environmental Engineering* Vol:5, No:2, 2011.

[8] Najim K.B., Hall M.R. A review of the fresh/hardened properties and applications for plain- (PRC) and self-compacting rubberised concrete (SCRC). *Construction and Building Materials,* Vol 24, 2043–2051, 2010.

[9] Xie J., Wang J., Rao R., Wang C., Fang C. Effects of combined usage of GGBS and fly ash on workability and mechanical properties of alkali activated geopolymer concrete with recycled aggregate. *Compos. Part B Eng.* 164,179–190 2019.

[10] Noushini A., Aslani F., Castel A., Gilbert R.I., Uy B., Foster S. Compressive stress-strain model for low-calcium fly ash-based geopolymer and heat-cured Portland cement concrete. *Cem. Concr. Compos.*, 73, 136–146, 2016.

[11] Kurtoğlu A.E., Alzeebaree R., Aljumaili O., Niş A., Gülşan M.E., Humur G., Çevik A. Mechanical and durability properties of fly ash and slag based geopolymer concrete. *Adv. Concr. Constr.* 6, 2018. https://doi.org/10.12989/acc.2018.6.4.345

[12] Zhang P., Zheng Y., Wang K., Zhang J. A review on properties of fresh and hardened geopolymer mortar. *Compos. Part B Eng.* 152, 79–95, 2018.

[13] Khaloo A., Raisi E.M., Hosseini P., Tahsiri H.. Mechanical performance of self-compacting concrete reinforced with steel fibers. *Constr. Build. Mater.*,51,179–186,2014. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.054

[14] Ravitheja A., Kumar N.L.N.K. A study on the effect of nano clay and GGBS on the strength properties of fly ash based geopolymers. Volume 19, Part-2,Pages:273-276,2019. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.06.761

[15] Bharat B.J., Rahul S. The effect of nanomaterials on properties of geopolymers derived from industrial by-products: A state-of-the-art review. *Construction and Building Materials*, Volume:252,119028,2020. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119028

[16] Mehrzad M. Nano Silica and Micro Silica Effect on Mechanical Attributes of Ferrochrome Slag Based Geopolymer. *Düzce University Journal of Science & Technology*, 8, 347-362, 2020. https://doi.org/10.29130/dubited.587321

[17] Jian H. *Synthesis and Characterization of Geopolymers for Infrastructural Applications*. PhD. Thesis, The Department of Civil and Environmental Engineering, Louisiana State University, Louisiana, USA, 2012.

[18] Wang Y., Zhang Y., Xu D. Study on alkali-activated silica fume and fly ash based geopolymer. *Bull Chin Ceramic Soc.*;30(1):50–4, 2011.

[19] Szostak B., Golewski G.L. Effect of Nano Admixture of CSH on selected strength parameters of concrete including fly ash. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering; p. 416012105 (6pp.), 2018.

[20] Fu Q., Xu W., Zhao X., Bu M., Yuan Q., Niu D. The microstructure and durability of fly ash-based geopolymer concrete: a review. *Ceram Int.*;47(21):29550–66, 2021.

[21] Catauro M, Tranquillo E., Barrino F., Dal P.G., Blanco I., Cicala G., et al. Mechanical and thermal properties of fly ash filled geopolymers. *Therm Anal Calorim.*;138(5):3267, 2019.

[22] Xiao Y.Z., Chen L., Komarneni S., Zhou C.H., Tong D.S., Yang H.M., Yu W.H., Wang H. Fly ash-based geopolymer: clean production, properties and applications. *Journal of Cleaner Production*, Vol: 125, Pages 253-267, 2016. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.019

[23] Gümüş A. *Geopolimer Beton Özelliklerine Termal Kür Prosesinin Etkisi*. Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Afyon, Turkey, 2016.

[24] Duxson P., Provis J.L., Lukey G.C., Mallicoat S.W., Kriven W.M., Van Deventer J.S.J. Understanding the relationship between geopolymer composition, microstructure and mechanical properties. *Colloids Surf, A* 269(1–3):47–58, 2005. https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2005.06.060

[25] Rowles M., O'Connor B. Chemical optimisation of the com pressive strength of aluminosilicate geopolymers synthesised by sodium silicate activation of metakaolinite. J Mater Chem., 2003. https://doi.org/10.1039/b212629j

[26] Stevenson M., Sagoe-Crentsil K. Relationship between composition, structure and strength of inorganic polymers: part 1—metakaolin-derived inorganic polymers. *J Mater Sci* 40(8):2023–2036, 2005.

[27] Jindal B. B., Alomayri T., Assaedi H., Cyriaque R.K. Geopolymer concrete with metakaolin for sustainability: a comprehensive review on raw material's properties, synthesis, performance, and potential application. *Environmental Science and Pollution Research*. https://doi.org/10.1007/s11356-021-17849-w

[28] Khater H.M., Gharieb M. Synergetic effect of nano-silica fume for enhancing physico-mechanical properties and thermal behavior of MK-geopolymer composites. *Constr. Build. Mater.*, Vol:350, 128879,2022. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128879

[29] Alaa M.R., Ahmed S.O. Thermal resistance of alkali-activated metakaolin pastes containing nano-silica particles. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*,136:609–620,2019. https://doi.org/10.1007/s10973-018-7657-1

[30] Gao K., Lin K.-L., Wang D., Hwang C.-L., Tuan B.L.A., Shiu H.-S., Cheng T.-W. Effect of nano-SiO_2 on the alkali-activated characteristics of metakaolin-based geopolymers. *Construction and Building Materials*, 48, 441–447, 2013.

[31] Zidi Z., Ltifi M., Zafar I. Characterization of Nano-Silica Local Metakaolin Based-Geopolymer: Microstructure and Mechanical Properties. *Open Journal of Civil Engineering*, 10, 143-161, 2020. https://doi.org/10.4236/ojce.2020.102013

[32] Zawrah M.F., Abo Sawan S.E., Khattab R.M., Abdel-Shaf A.A. Effect of nano sand on the properties of metakaolin-based geopolymer: Study on its low rate sintering. *Construction and Building Materials*, Vol: 246,118486,2020. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118486

[33] Revathi T., Jeyalakshmi R., Rajamane N.P. Study on the role of n-SiO_2 incorporation in thermo-mechanical and microstructural properties of ambient cured FA-GGBS geopolymer matrix. *Applied Surface Science*, Volume 449, Pages 322-331, 2018. https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.01.281

[34] Assaedi H., Shaikh F.U.A., I.M. Low. Effect of nano-clay on mechanical and thermal properties of geopolymer. *Journal of Asian Ceramic Societies* 4, 19–28,2016. https://doi.org/10.1016/j.jascer.2015.10.004

[35] Khater H.M., El-Sabbagh B.A., Fanny M., Ezzat M., Lottfy M. and El Nagar A.M. Effect of Nano-Clay on Alkali Activated WaterCooled Slag Geopolymer. *British Journal of Applied Science & Technology*, 3(4): 764-776, 2013.

[36] Zidi Z., Ltifib M., Ayadi Z.B., El Mir L. and Nóvoa X.R. Effect of nano-ZnO on mechanical and thermal properties of geopolymer. *Journal of Asian Ceramic Societies*, Vol. 8, No. 1, 1–9, 2020. https://doi.org/10.1080/21870764.2019.1693682

[37] Wang Y., Xu M., Zhao J., Xin A. Nano-ZnO modified geopolymer composite coatings for flame-retarding plywood. *Construction and Building Materials*, 338, 127649, 2022. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127649

[38] Sivasakthi M., Jeyalakshmi R., and Rajamane N.P. Investigation of Microstructure and Thermomechanical Properties of Nano-TiO_2 Admixed Geopolymer for Thermal Resistance Applications. *JMEPEG*, 30:3642–3653, 2021. https://doi.org/10.1007/s11665-021-05708-1

[39] Zidi Z., Ltifi M., Ayadi Z.B. & El Mir L. Synthesis of nano-alumina and their effect on structure, mechanical and thermal properties of geopolymer. Journal of Asian Ceramic Societies, Vol. 7, No. 4, 524–535,2019. https://doi.org/10.1080/21870764.2019.1676498

[40] El Nagar AM, Khater HM. Development of High Thermal Stability Geopolymer Composites Enhanced by Nano Metakaolin. *J. Build. Mater. Struct.* 6: 10-19, 2019. DOI : 10.5281/zenodo.2604753

[41] Zhang M.-H., Islam J., Peethamparan S. Use of nano-silica to increase early strength and reduce setting time of concretes with high volumes of slag. *Cem. Concr. Compos.*;34:650–662, 2012. doi:10.1016/j.cemconcomp.2012.02.005

[42] Aggarwal P., Singh R.P., Aggarwal Y. Use of nano-silica in cement based materials—A review. *Cogent Eng.*;2:1078018, 2015. doi: 10.1080/23311916.2015.1078018

[43] Quercia G., Hüsken G., Brouwers H.J.H. Water demand of amorphous nano silica and its impact on the workability of cement paste. *Cem. Concr. Res.*;42:344–357, 2012. doi: 10.1016/j.cemconres.2011.10.008.

[44] Givi A.N., Rashid S.A., Aziz F.N.A., Salleh M.A.M. Experimental investigation of the size effects of SiO_2 nano-particles on the mechanical properties of binary blended concrete. *Compos. Part B Eng.*;41:673–677, 2010. doi: 10.1016/j.compositesb.2010.08.003.

[45] Ibrahim M., Johari M.A.M., Maslehuddin M., Rahman M.K. Influence of nano-SiO_2 on the strength and microstructure of natural pozzolan based alkali activated concrete. *Constr. Build. Mater.*;173:573–585, 2018. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.04.051.

[46] Fatheali A.S., Sharanabasava V.G., Veerabhadragouda B.P., Khan T.Y., Almakayeel N. M. and Alghamdi S. Review on the Relationship between Nano Modifications of Geopolymer Concrete and Their Structural Characteristics. *Polymers*, 14, 1421, 2022. https://doi.org/10.3390/polym14071421

[47] Zheng Z, Mounsamy M, Lauth-de Viguerie N, et al. Luminescent zinc oxide nanoparticles: from stabilization to slow digestion depending on the nature of polymer coating. *Polym Chem.*;10:145–154, 2019.

[48] Ponnamma D, Cabibihan -J-J, Rajan M, et al. Synthesis, optimization and applications of ZnO/polymer nanocomposites. *Mater Sci Eng C.*;98:1210–1240, 2019.

[49] Chakradhara R. M., Nikhil K. V., Shailendra Kumar. Critical review on fly-ash based geopolymer concrete. *Structure Concrete*, Volume21, Issue3, 1013-1028, https://doi.org/10.1002/suco.201900326

[50] Adak D., Sarkar M., Mandal S. Effect of nano-silica on strength and durability of fly ash based geopolymer mortar. *Construction and Building Materials*, Vol:70, Pages:453-459. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.093

[51] José S. M., Belén C., Jesús S., Ramón T. Metakaolin-Nanosilver as Biocide Agent in Geopolymer. https://doi.org/10.1002/9781118217542.ch1

[52] Sofi M., Deventer J.S.J.van, Mendis P.A., Lukey G.C. Engineering properties of inorganic polymer concretes (IPCs). *Cement and Concrete Research*, Volume 37, Issue 2, Pages 251-257. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.10.008

[53] Wefers K. *Alumina chemicals: science and technology handbook*, Am. Ceram. Soc. Westerville, Ohio, USA. 13, 1990.

[54] Reid C.B., Forrester J.S., Goodshaw H.J., Kisi E.H., Suaning G.J. A study in themechanical milling of alumina powder. *Ceram. Int.,* 34, 1551–1556, 2008. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2007.05.003

[55] Behfarnia K., Salemi N. The effects of nano-silica and nano-alumina on frost resistance of normal concrete. *Constr. Build. Mater.*, 48, 580–584, 2013. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.07.088

[56] Jo B.W., Kim C.H., Tae G., Park J.B. Characteristics of cement mortar with nano-SiO_2 particles. *Constr. Build. Mater.*, 21, 1351–1355, 2007. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.12.020

[57] Li W., Li X., Chen S.J., Long G., Liu Y.M., Duan W.H.. Effects of nanoalumina and graphene oxide on early-age hydration and mechanical properties of cementpaste. *J. Mater. Civ. Eng.,* 29, 4017087, 2017. https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001926

[58] Li Z., Wang H., He S., Lu Y., Wang M. Investigations on the preparation and mechanical properties of the nano-alumina reinforced cement composite. *Mater. Lett.*, 60, 356–359, 2006 https://doi.org/10.1016/j.matlet.2005.08.061

[59] Belver C., Vicente M.A. Porous Silica Gel by Acid Leaching of metakaolin. *Materials Syntheses, Springer*, Vienna, pp. 47–51, 2008.

[60] Abo-El-Enein S.A., Heikal M., Amin M.S., et al. Reactivity of dealuminated kaolin and burnt kaolin using cement kiln dust or hydrated lime as activators. *Construct. Build. Mater.,* 47, 1451–1460, . 2013.

[61] El-Gamal S.M.A., Amin M.S., Ramadan M. Hydration characteristics and compressive strength of hardened cement pastes containing nano-metakaolin. *HBRC J.*, 13, (1), 144-121, 2017.

[62] Sayanam R.A., Kalsotra A.K., Mehta S.K., et al. Studies on thermal transformations and pozzolanic activities of clay from Jammu region (India). *J.Therm. Anal.,* 35, (1), 99–106, 1989.

[63] Chen C.Y., Tuan W.H.. Evolution of mullite texture on firing tape-cast kaolin bodies. *J. Am. Ceram. Soc.*, 85, (5), 1121–1126, 2002.

[64] Berodier E., Scrivener K.. Impact of Filler on Hydration kinetics. *32nd Cement and Concrete Science Conference*. Queen's University Belfast, pp. 1–4, 2012.

[65] Sabir B.B., Wild S., Bai J. Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review. *Cement Concr. Compos.*, 23, (6), 441–454, 2001.

[66] Zhang D., Zhou C.H., Lin C.X., et al. Synthesis of clay minerals. *Appl. Clay Sci.,* 50, (1), 1–11, 2010.

[67] Peng Zhang, Yuanxun Zheng, Kejin Wang, Jinping Zhang, A review on properties of fresh and hardened geopolymer mortar, Composites B, Eng. 152 (2018) 79–95.

[68] C.Y. Heah, H. Kamarudin, A.M. Mustafa Al Bakri, M. Bnhussain, M. Luqman, I. Khairul Nizar, Study on solids-to-liquid and alkaline activator ratios on kaolin based geopolymers, Constr. Build. Mater. 35 (2012) 912–922.

[69] M. Sivasakthi, R. Jeyalakshmi, N.P.B. Rajamane, Rinu Joseb, Thermal and structural micro analysis of micro silica blended fly ash based geopolymer composites, J. Non-Cryst. Solids 499 (2018) 117–130.

[70] Zaharaki D, Komnitsas K, Perdikatsis V. Use of analytical techniques for identification of inorganic polymer gel composition. J Mater Sci 2010;45:2715–24.