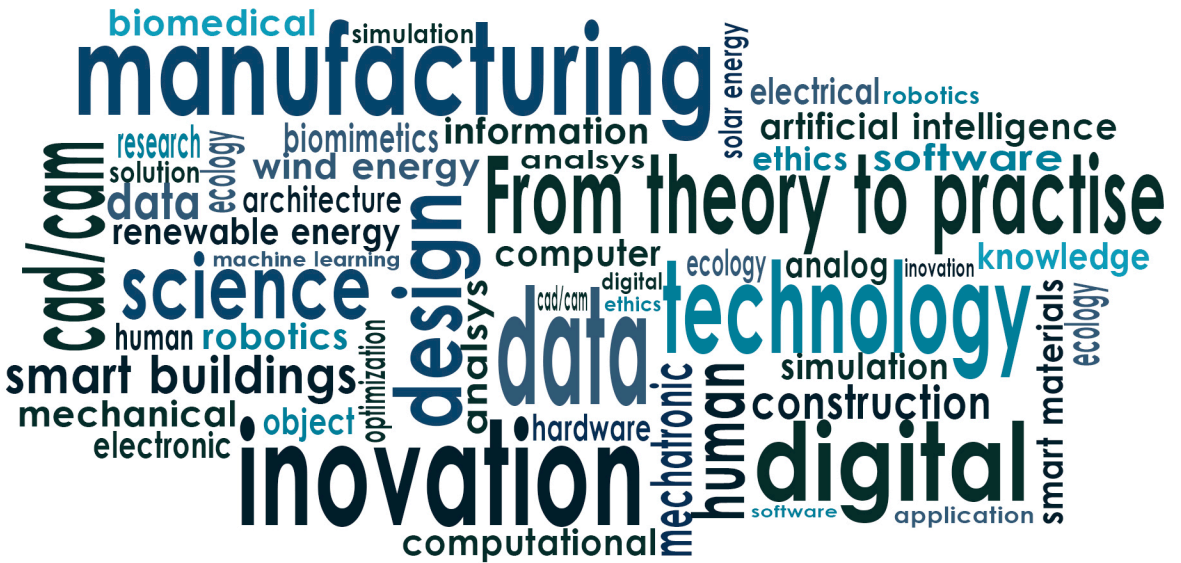




# Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi International Journal of Technological Sciences

Elektronik Dergi, e-ISSN: 1309-1220

Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi



# Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi

## International Journal of Technological Sciences

Sahibi / Owner  
Ali Kemal YAKUT

Yayın Yönetmeni / Publishing Manager  
Reşat SELBAŞ

Editör / Editor in Chief  
Nihat YILMAZ

Yardımcı Editörler / Vice Editors  
Önder KIZILKAN  
Ergün KORKMAZ

Alan Editörleri/Associate Editors

Abdullah ÖZSOY  
Cengiz ÖZEL  
Okan BİNGÖL  
İsmail Serkan ÜNCÜ

Editör Kurulu / Editorial Board

Ali Kemal YAKUT  
Reşat SELBAŞ  
Arzu ŞENCAN ŞAHİN  
Ahmet KABUL

Yayın Danışma Kurulu/Editorial Advisory Board

Hiroshi YAMAGUCHI, Doshisha University  
İbrahim DİNÇER, Ontario Tech University  
Mustafa ACAROĞLU, Konya Teknik Üniversitesi  
Mustafa Reşit USAL, Süleyman Demirel Üniversitesi  
Ramazan KÖSEOĞLU, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi  
Refik KAYALI, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi  
Bekir YALÇIN, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Turkey  
Özlem TERZİ, Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi

Mustafa AY, Marmara Üniversitesi  
Şemsettin KILINÇARSLAN, Süleyman Demirel Üniversitesi  
Ecir Uğur KÜÇÜKSİLLE, Süleyman Demirel Üniversitesi  
Ömer Necati CORA, Karadeniz Teknik Üniversitesi  
Mehmet Akif EZAN, Dokuz Eylül Üniversitesi  
Nabi İBADOV, Warsaw University of Technology, Poland  
Murat Öztürk, Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Turkey

Grafik Tasarım / Graphic Design  
Sinan İLKAZ

Teknik Sorumlu / Technical Manager  
Serap ERGÜN  
Nejat TÜKENMEZ

Mizanpaj / Make-up  
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](mailto:utbd@isparta.edu.tr)

Uluslararası 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: 14

Sayı/Number: 2

Ağustos/August 2022

e - ISSN : 1309-1220



İÇİNDEKİLER / CONTENTS

Sayfa No

Araştırma Makalesi

Güç sistemlerinde farklı generatör denetleyici modelleri ile küçük sinyal kararlılığının incelenmesi Investigation of small signal stability with different generator controller models in power systems .....	50-57
M. Kenan DÖŞOĞLU, Mahmut ÖZBAY	
Ayrık dalgacık dönüşümü ve Xgboost ile rüzgâr gücü tahmini Wind power forecasting with discrete wavelet transform and Xgboost .....	58-65
Mehmet Ali YELGEÇ, Okan BİNGÖL	
Güç sistemlerinde çoklu SVC kullanımı ile statik gerilim kararlılığının iyileştirilmesi Enhancement of static voltage stability using multiple SVC in power systems .....	66-74
M. Kenan DÖŞOĞLU, Enes KAYMAZ, Muhammet DEMİRBAŞ	
Serpantin asfalt betonunda filler olarak kullanımı Using serpentine as filler in asphalt concrete .....	75-86
Bektaş Sümen, Nihat Morova	
Tuzlama uygulamalarının donma-çözülme döngülerine maruz kalmış asfalt betonu üzerindeki korozif etkisi The corrosive effect of brine applications on the asphalt concrete exposed to the freeze-thaw cycles.....	87-93
Hande Varol Morova	
Comparative assessment of solar energy-based transcritical CO2 Rankine cycles for different layouts Güneş enerjisi kaynaklı farklı transkritik CO2 Rankine çevrimlerinin karşılaştırılması .....	94-102
Serpil ÇELİK TOKER, Önder KIZILKAN	

Araştırma Makalesi/Research Article

### Güç sistemlerinde farklı generatör denetleyici modelleri ile küçük sinyal kararlılığının incelenmesi

M. Kenan DÖŞOĞLU<sup>ID</sup>\*1, Mahmut ÖZBAY<sup>ID</sup>2

<sup>1</sup>Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, 81620, Düzce, Türkiye

<sup>2</sup>Düzce Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, 81620, Düzce, Türkiye

#### Anahtar Kelimeler

GSKK  
OGR  
TY  
Senkron generatör  
Küçük sinyal kararlılığı

#### Makale geçmişi:

Geliş Tarihi: 02.03.2022

Kabul Tarihi: 20.04.2022

**Öz:** Çok makinalı güç sistemlerinin sürekli, ekonomik ve güvenilir olarak çalışmasında benzetim programları yardımı ile kararlılık analizleri incelenmektedir. Güç sistemlerinde en yaygın olarak yapılan kararlılık analizi küçük sinyal kararlılığıdır. Bu çalışmada çalışmasında 4 makinalı 2 alanlı test sisteminde farklı generatör denetleyici modelleri ile küçük sinyal kararlılığı analizi incelenmiştir. Farklı generatör denetleyici modelleri olarak Güç Sistem Kararlı Kılıcısı Denetleyicisi (GSKK), Otomatik Gerilim Regülatörü (OGR) ve Türbin Yöneticisi (TY) kullanılmıştır. Benzetim çalışması Güç Sistemleri Analiz Programı (PSAT)'da gerçekleştirilmiştir. Senkron generatörde denetleyicilerin olmadığı durum ile GSKK, OGR ve TY modellerinin olduğu durumların karşılaştırmaları yapılmıştır. Karşılaştırmalar şekiller ve tablolar halinde verilmiştir. Bu çalışmada GSKK, OGR ve TY modellerinin senkron generatörde kullanılması sistemin kısa süre içerisinde kararlı hale geldiği, parametrelerdeki salınımların azaldığı ve sistemin küçük sinyal kararlılığı açısından daha etkili sonuçlar verdiği görülmüştür.

#### Atf için/To Cite:

Döşoğlu M.K. Özbay M. Güç sistemlerinde farklı generatör denetleyici modelleri ile küçük sinyal kararlılığının incelenmesi. Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi, 14(2), 50-57, 2022.

### Investigation of small signal stability with different generator controller models in power systems

#### Keywords

PSS  
AVR  
TG  
Synchronous generator  
Small signal stability

#### Article history:

Received: 02.03.2022

Accepted: 20.04.2022

**Abstract:** Stability analyzes are examined with the help of simulation programs in the continuous, economical and reliable operation of multi-machine power systems. The most common stability analysis in power systems is small signal stability. In this study, small signal stability analysis was investigated with different generator controller models in a 4-machine 2-field test system. Power System Stabilizer (PSS), Automatic Voltage Regulator (AVR) and Turbine Governor (TG) are used as different generator controller models. The simulation study was carried out in the Power Systems Analysis Program (PSAT). Comparisons were made between the situation where there are no controllers in the synchronous generator and the situations with PSS, AVR and TG models. Comparisons are given in figures and tables. In this study, it was observed that the use of PSS, AVR and TG models in a synchronous generator stabilized the system in a short time, the oscillations in the parameters were reduced and the system gave more effective results in terms of small signal stability.

#### 1. Giriş

Güç sistemlerinin çalışma koşulları teknoloji ve endüstriyel gelişmeler nedeniyle karmaşık bir hal almaktadır. Karmaşık hal alan güç sistemlerinin benzetim programında analizleri ile kararlılık durumları incelenmektedir. Kararlılık analizleri

içerisinde en yaygın olarak kullanılanlarından birisi de küçük sinyal kararlılığı analizidir. Çok makinalı güç sistemlerinde küçük sinyal kararlılığı ile ilgili literatürde birçok çalışma bulunmaktadır. Güç sistemlerinde küçük sinyal kararlılığı analizi için kullanılan bazı yaklaşımlar bulunmaktadır. Bunlar faz ölçüm ünitesi, ayrık kısmi diferansiyel denklem

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

çözümleme modülü, uygun zaman çalışma modülü, doğrusal ayrık çalışma modülü ve yüksek zaman çözümleme ünitelerinde oluşmaktadır. Bu farklı yaklaşımlar sayesinde güç sistemlerinde daha az salınımların olduğu ve küçük sinyal kararlılığının iyileştiği görülmüştür [1-3]. Dahası farklı güç sistemlerinde küçük sinyal kararlılığı analizi için kullanılan eş zamanlı iterasyon, seçici model analizi ve modifiye edilmiş yöntemleri ile küçük sinyal kararlılığı analizlerinde benzetim çalışmasının performansının arttığı görülmüştür. Bu yöntemler ile sistemin özdeğerinin hesaplanmasında ve dinamik performansının sağlanmasında kullanılan yöntemlerin küçük sinyal kararlılığı üzerinde etkileyici sonuçlar verdiği görülmüştür [4-6]. Küçük sinyal kararlılığı analizinde kullanılan yaklaşımlardan birisi de sistem empedans kriteri belirleme yöntemidir. Yük değişimleri, giriş gerilim ve akım değişimine göre tasarlanan bu yöntem özdeğer hesaplamasında kolaylık sağlamaktadır. Sistem yüklenmesinde haritalama yaklaşımı kullanımı ile küçük sinyal kararlılığı iyileştirilmektedir [7-9]. Karmaşık yapılu güç sistemlerinde ağır yüklenme koşulları altında özdeğer analizinde farklı benzetim programları kullanılarak kapsamlı analizler gerçekleştirilmiştir. Bu analizler ile yüklenme koşullarına göre küçük sinyal kararlılığı karşılaştırmaları yapılmıştır [10]. Güç sistemlerinde küçük sinyal kararlılığı analizinde senkron generatörlerde kontrol modellerinin geliştirilmesi ile ilgili çalışmalar bulunmaktadır. Bunlar OGR, GSKK, TY modelleridir. Bu modeller bazı çalışmalarda GSD uyarım modelleri ve OGR ile birlikte kullanılırken, diğer farklı çalışmalarda da GSD geliştirilerek farklı analiz yaklaşımları için kullanılmaktadır. Güç sistemlerinin çok alanlı çalışmalarında frekans düşmeleri ve salınımları azaltmada etkin olarak GSD modelleri uyarım modelleri ile birlikte kullanılmıştır. GSKK ve OGD modellerinin küçük sinyal kararlılığı ve özdeğer hesaplamalarında da etkili olduğu görülmüştür [11-13].

Yapılan bu çalışmada literatürde yaygın olarak kullanılan GSKK ve OGD modellerinin salınımların azaltılması ve küçük sinyal kararlılığının iyileştirilmesi için daha farklı bir yöntem önerilmiştir. Bu yöntemde GSKK ve OGD'ye ilaveten TY modelinin kullanılması düşünülmektedir. Senkron generatörde tek çıkış olarak kullanılan GSKK ve OGD modellerine ikinci bir çıkış olarak TY modeli eklenmiştir. Bu geliştirme ile makalenin literatüre farklı bir katkısı bulunmaktadır. Farklı tip modelleri olan bu modellerin karşılaştırmalar sonucu en optimum modelleri tespit edilmiş olup, bunlar ile senkron generatörde denetleyicilerin olmadığı durumlar karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalar sonucunda TY modelin sisteme ilave edilmesi ile etkili sonuçlar elde edildiği görülmüştür.

## 2. Senkron Generatörlerde Denetleyici Modelleri

Çok makinalı güç sistemlerinde senkron generatörün kontrolünde farklı denetleyiciler kullanılmaktadır. Bunların en yaygın olarak kullanılanları GSKK, OGD ve TY modelleridir. Senkron generatörde GSKK modeli geçici kararlılık esnasında sistemde meydana gelen salınımları azaltmaktır. Kullanılmasındaki asıl amaç geçici durumlarda esnasında meydana gelen güç sistemi salınımlarını sönümleyip, kısa zaman içerisinde sistemi kararlı hale getirmektir [14]. GSKK modeli senkron generatörlerde 3 farklı model olarak kullanılmaktadır. Bunlar GSKK 1, GSKK 2 ve GSKK 3 modelleridir. Bu üç modelin matematiksel ifadeleri denklem 1 ile denklem 3 arasında gösterilmektedir.

$$\begin{aligned}\dot{v}_1 &= -(K_\omega \omega + K_p P_g + K_v V_g + v_1) / T_\omega \\ \dot{v}_s &= (K_\omega \omega + K_p P_g + K_v V_g + v_1 + v_s) / T_e\end{aligned}\quad (1)$$

$$\begin{aligned}\dot{v}_1 &= -\frac{K_\omega V_{SI} + v_1}{T_\omega} \\ \dot{v}_2 &= \frac{1}{T_2} \left[ \left( 1 - \frac{T_1}{T_2} \right) (K_\omega V_{SI} + v_1) - v_2 \right] \\ \dot{v}_3 &= \frac{1}{T_4} \left\{ \left( 1 - \frac{T_3}{T_4} \right) \left[ v_2 + \frac{T_1}{T_2} (K_\omega V_{SI} + v_1) \right] - v_3 \right\} \\ \dot{v}_s &= \frac{1}{T_e} \left\{ v_3 + \frac{T_3}{T_4} \left[ v_2 + \frac{T_1}{T_2} (K_\omega V_{SI} + v_1) \right] - v_s \right\}\end{aligned}\quad (2)$$

$$\begin{aligned}\dot{v}_1 &= -\frac{K_\omega V_{SI} + v_1}{T_\omega} \\ \dot{v}_2 &= \frac{1}{T_4} v_3 + \frac{1}{T_4} \left( T_1 - T_2 \frac{T_3}{T_4} \right) (K_\omega V_{SI} + v_1) \\ \dot{v}_3 &= -v_2 - \frac{T_2}{T_4} v_3 + \left[ 1 - \frac{T_3}{T_4} - \frac{T_2}{T_4} \left( T_1 - T_2 \frac{T_3}{T_4} \right) \right] (K_\omega V_{SI} + v_1) \\ \dot{v}_s &= \frac{1}{T_e} \left[ v_2 + \frac{T_3}{T_4} (K_\omega V_{SI} - v_1) - v_s \right]\end{aligned}\quad (3)$$

OGR modeller senkron generatörünü belirli bir referans gerilimde tutmaya yaramaktadır. Ölçülen gerilim değeri ile referans gerilimi karşılaştırması yapılarak hata sinyali üretmede kullanılmaktadır. Senkron generatörde OGR1, OGR 2 ve OGR 3 modelleri kullanılmaktadır. Bu üç modelin matematiksel ifadeleri denklem 4 ile denklem 6 arasında gösterilmiştir.



$$\begin{aligned}
\dot{v}_m &= \frac{V - v_m}{T_r} \\
\dot{v}_{r1} &= \frac{1}{T_1} \left[ \mu_0 \left( 1 - \frac{T_2}{T_1} \right) (v_{ref} - v_m) - v_{r1} \right] \\
\dot{v}_{r2} &= \frac{1}{T_4} \left[ \left( 1 - \frac{T_3}{T_4} \right) (v_{r1} + \mu_0 \frac{T_2}{T_1} (v_{ref} - v_m)) - v_{r2} \right] \\
v_r^* &= v_{r2} + \frac{T_3}{T_4} \left[ v_{r1} + \mu_0 \frac{T_2}{T_1} (v_{ref} - v_m) - v_{r1} \right] \\
\dot{v}_f &= -\frac{1}{T_e} \left[ v_f (1 + S_e(v_f)) - v_r \right]
\end{aligned} \tag{4}$$

$$\begin{aligned}
\frac{dv_{r1}}{dt} &= \frac{1}{T_a} \left[ Ka \left( v_{ref} - v_m - v_{r2} - \frac{Kf}{Tf} v_f \right) - v_{r1} \right] \\
\frac{dv_m}{dt} &= \frac{V - v_m}{T_r} \\
\frac{dv_f}{dt} &= -\frac{1}{T_e} \left[ v_f (1 + S_e(v_f)) - v_r \right] \\
\frac{dv_{r2}}{dt} &= -\frac{1}{T_f} \left( \frac{K_f}{T_f} v_f + v_{r2} \right)
\end{aligned} \tag{5}$$

$$\begin{aligned}
\dot{v}_m &= \frac{V - v_m}{T_r} \\
\dot{v}_r &= \frac{1}{T_2} \left[ \mu_0 \left( 1 - \frac{T_1}{T_2} (v_{ref} - v_m) \right) - v_r \right] \\
\dot{v}_f &= \frac{1}{T_e} \left[ \left( v_r + \mu_0 \frac{T_1}{T_2} (v_{ref} - v_m) + v_{f0} \right) \frac{V}{V_0} - v_f \right]
\end{aligned} \tag{6}$$

TG senkron generatörün ilk frekans ayarlayıcısı modelidir. Frekansa bağlı olarak sistem kontrolünü adım adım kontrol eden devre modelidir. Senkron generatörde 2 çeşit TG modeli kullanılmaktadır. Bunlar TG1 ve TG 2 modelleridir. TG1 ve TG 2 modellerin matematiksel eşitlikleri denklem 7 ve denklem 8'de gösterilmiştir.

$$\begin{aligned}
p_{in}^* &= p_{order} + \frac{1}{R} (\omega_{ref} - \omega) \\
p_{in} &= \begin{cases} p_{in}^* & \text{if } p^{\min} \leq p_{in}^* \leq p^{\max} \\ p^{\max} & \text{if } p_{in}^* > p^{\max} \\ p^{\min} & \text{if } p_{in}^* < p^{\min} \end{cases} \\
\dot{x}_{g1} &= (p_{in} - x_{g1}) / T_s
\end{aligned} \tag{7}$$

$$\begin{aligned}
\dot{x}_{g2} &= \left( \left( 1 - \frac{T_3}{T_c} \right) x_{g1} - x_{g2} \right) / T_c \\
\dot{x}_{g3} &= \left( \left( 1 - \frac{T_4}{T_5} \right) \left( x_{g2} + \frac{T_3}{T_c} x_{g1} \right) - x_{g3} \right) / T_5 \\
p_m &= x_{g3} + \frac{T_4}{T_5} \left( x_{g2} + \frac{T_3}{T_c} x_{g1} \right) \\
\dot{x}_g &= \left( \frac{1}{R} \left( 1 - \frac{T_1}{T_2} \right) (\omega_{ref} - \omega) - x_g \right) / T_2 \\
p_m^* &= x_g + \frac{1}{R} \frac{T_1}{T_2} (\omega_{ref} - \omega) + p_m^0 \\
p_m &= \begin{cases} p_m^* & \text{if } p^{\min} \leq p_m^* \leq p^{\max} \\ p^{\max} & \text{if } p_m^* > p^{\max} \\ p^{\min} & \text{if } p_m^* < p^{\min} \end{cases}
\end{aligned} \tag{8}$$

Burada;  $v_1$ , arındırma devre sinyali;  $v_s$ , GSKK çıkış sinyali;  $v_3$ ,  $T_1$ ,  $T_2, T_3$  ve  $T_4$ , GSKK zaman sabitleri;  $P_g$ , GSKK bağlı durumda senkron generatörün aktif gücü;  $V_g$ , GSKK bağlı durumda senkron generatör gerilimi;  $K_v$ , gerilim kazancı;  $T_\omega$ , arındırma zaman sabiti;  $T_e$ , anti-windup zaman sabiti,  $v_{ref}$ , AVR'nin referans gerilimi;  $v_m$ , ölçüm devresi çıkışı;  $v_r$ , AVR, ve  $v_f$ , geri besleme gerilimi;  $\mu_0$ , regülatör kazancı;  $T_1$ ,  $T_2, T_3$  ve  $T_4$ , AVR zaman sabitleri;  $T_e$ , alan devresi sabiti;  $T_r$ , ölçüm süresi sabiti;  $v_{r,min}$ ,  $v_r$ 'nin alt limiti,  $v_{r,max}$ ,  $v_r$ 'nin üst limiti;  $v_{r1}$  yükseltici durum değişkeni;  $v_{r2}$  dengeleyici durum değişkenidir.  $S_e$ , uyarıcının doygunluk fonksiyonudur [14]. Diğer modellerden farklı olarak;  $V_{f0}$  ilk alan gerilimi,  $V_0$  ise bara offset gerilimi,  $\omega_{ref}$ , referans hız;  $p^{\max}$  maksimum türbin çıkışı;  $p^{\min}$  minimum türbin çıkışı;  $T_s$  yönetici zaman sabiti;  $T_c$  servo zaman sabiti;  $T_3$  geçici kazanç zaman sabiti;  $T_4$  güç oranı zaman sabiti;  $T_5$ , reheat zaman sabiti;  $u$  bağlantı durumudur.

### 3. Küçük Sinyal Kararlılığı

Küçük sinyal kararlılığı güç sistemindeki farklı yük değişimleri ile birlikte senkron generatörlerin senkronizmasının bozulmama durumu olarak tanımlanmaktadır. Küçük sinyal kararlılığı analizinde elektromekanik mod ve özdeğer analizi yaklaşımı kullanılmaktadır. Elektromekanik modda yerel ve bölgeler arası çalışmalardaki sistem frekans durumları

incelenmektedir. Özdeğerde ise yerel ve bölgeler arasındaki çalışmalarda sistemdeki salınımların sönümlenmesi ele alınmaktadır. Özdeğer analizinde sistem denge noktasında iken doğrusal olmayan bir sistem olduğu varsayılmaktadır. Doğrusal olmayan sistemdeki ilişki denklem 9 ve denklem 10'da gösterilmiştir.

$$\dot{x}_0 = f(x_0, u_0) = 0 \quad (9)$$

$$y_0 = g(x_0, u_0) \quad (10)$$

Burada,  $x_0$  ve  $u_0$  u denge noktasındaki durum ve giriş,  $y_0$  denge noktasındaki çıkış,  $x$  değeri,  $x_0$  durum değişkenindeki değişiklik olarak kabul edilebilir. Buna bağlı olan ilişki denklem 11'de gösterilmiştir.

$$\dot{x} = \dot{x}_0 + \Delta \dot{x} \quad (11)$$

Burada,  $\Delta x$  bozulma olduğundaki  $x_0$  durumundaki farklılıktır. Buna bağlı olarak  $x$  değerinin türevi denklem 12'de gösterilmiştir.

$$\dot{x} = f[(x_0 + \Delta x), (u_0 + \Delta u)] \quad (12)$$

Sistemdeki bozulma küçük sinyal kararlılığı hesaplanması küçük olduğu durumlarda gibi Taylor serisinin genişletmesi sağlanmaktadır. Buna göre giriş ve çıkış ifadelerinin taylor serisindeki genişletilmesi denklem 13 ile denklem 18 arasında gösterilmiştir.

$$\dot{x}_n = \dot{x}_{n-0} + \Delta \dot{x}_n \quad (13)$$

$$= f_n[(x_0 + \Delta x), (u_0 + \Delta u)] \quad (14)$$

$$= f_n(x_0, u_0) + \frac{\partial f_n}{\partial x_1} \Delta x_1 + \dots + \frac{\partial f_n}{\partial x_m} \Delta x_m + \frac{\partial f_n}{\partial u_1} \Delta u_1 + \dots + \frac{\partial f_n}{\partial u_q} \Delta u_q \quad (15)$$

$$\dot{x}_n = \Delta \dot{x}_n \quad (16)$$

$$= \frac{\partial f_n}{\partial x_1} \Delta x_1 + \dots + \frac{\partial f_n}{\partial x_m} \Delta x_m + \frac{\partial f_n}{\partial u_1} \Delta u_1 + \dots + \frac{\partial f_n}{\partial u_q} \Delta u_q \quad (17)$$

$$\Delta y_m = \frac{\partial g_m}{\partial x_1} \Delta x_1 + \dots + \frac{\partial g_m}{\partial x_m} \Delta x_m + \frac{\partial g_m}{\partial u_1} \Delta u_1 + \dots + \frac{\partial g_m}{\partial u_q} \Delta u_q \quad (18)$$

Taylor seri açılımı hesaplamasında küçük sinyal kararlılığında kullanılan durum ve kontrol değişkeni ifadeleri denklem 19 ve denklem 20'de gösterilmiştir.

$$\Delta \dot{x} = A \Delta x + B \Delta u \quad (19)$$

$$\Delta y = C \Delta x + D \Delta u \quad (20)$$

Denklem 19 ve denklem 20'de kullanılan A, B, C ve D katsayılarının genişletilmiş hali denklem 21 ve denklem 22'de gösterilmiştir.

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_m} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial f_m}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_m}{\partial x_m} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial u_q} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial f_m}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial f_m}{\partial u_q} \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$C = \begin{bmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial g_1}{\partial x_m} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial g_m}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial g_m}{\partial x_m} \end{bmatrix}, D = \begin{bmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial g_1}{\partial u_q} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial g_m}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial g_m}{\partial u_q} \end{bmatrix} \quad (22)$$

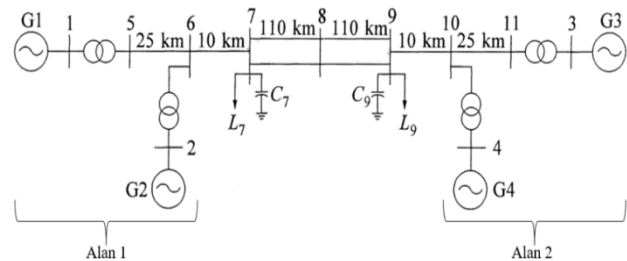
Küçük sinyal kararlılığındaki doğrusallaştırma işlemi için karakteristik denklem kullanılmaktadır. Karakteristik ifade denklem 23'de gösterilmiştir.

$$\det(A - \lambda I) = 0 \quad (23)$$

Burada,  $\lambda$  A matrisinin özdeğeridir.  $\lambda$  değeri genellikle bir sistemin kararlılığını temsil etmektedir. Sistemin kararlı olup olmaması 3 duruma göre belirlenmektedir.  $\lambda < 0$  ise sistem kararlıdır.  $\lambda = 0$  ise sistem kritik konumdadır.  $\lambda > 0$  ise sistem kararsızdır [15].

#### 4. Benzetim Çalışması

Bu çalışmada Kundur'un 2 bölge test sistemi üzerinde senaryolar üretilerek gerçekleştirilmiştir. Bu analizler Güç Sistemleri Analizi Programı'ndan (PSAT) kullanılmıştır [16]. Kundur 2 Bölge 4 generatörlü test sistemi Şekil 1'de gösterilmiştir.

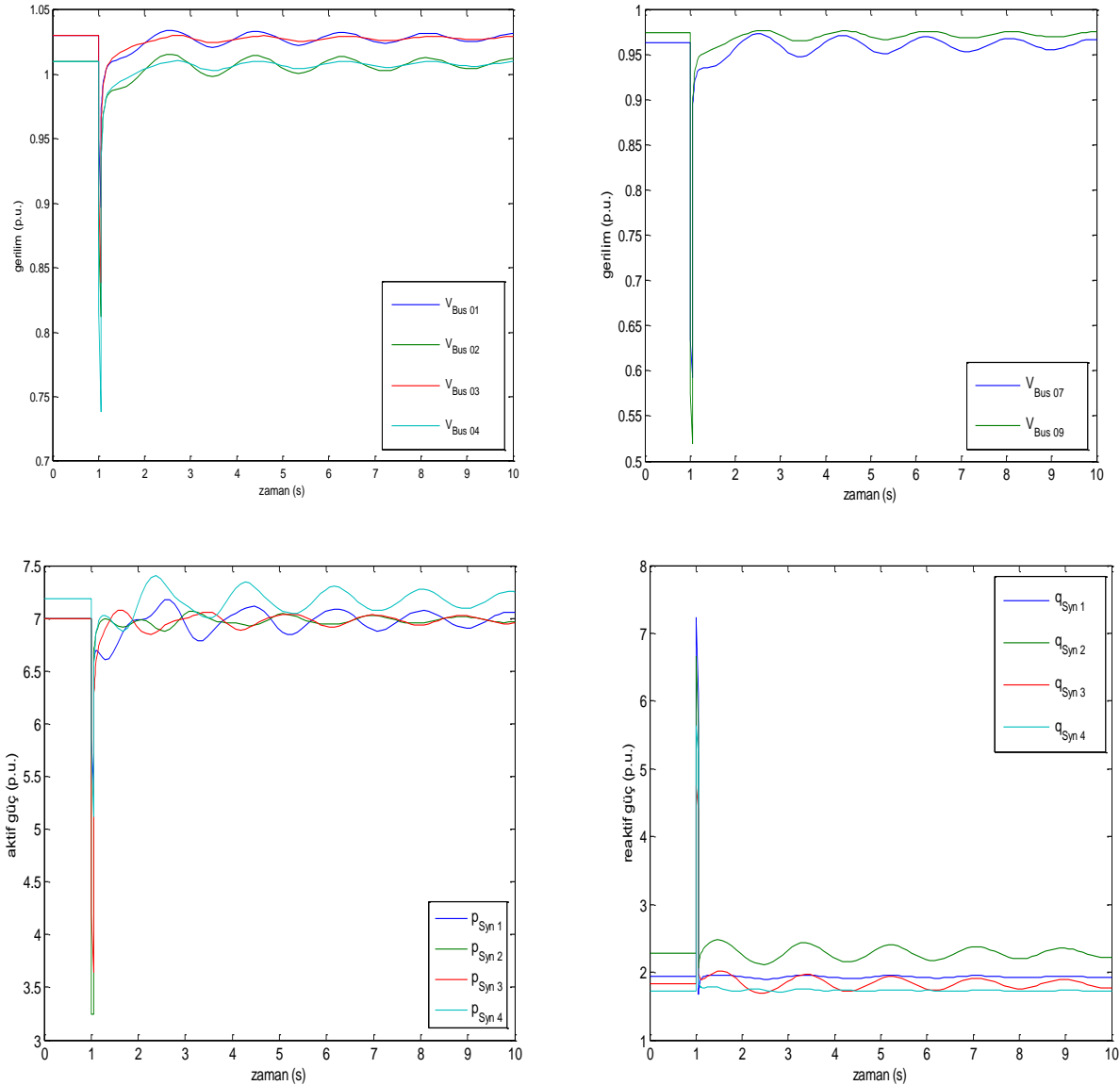


Şekil 1. Kundur 2 bölgesi 4 generatörlü test sistemi

Kundur'un iki bölge test sisteminde 1 adet salınım barası, 4 adet generatör, 12 adet iletim hattı, iki adet yük bulunmaktadır. İki bölmeli test sisteminde 1-5, 2-6, 3-11, 4-10 iletim hatlarında gerilimi yükselten transformatörler kullanılmıştır. Bu test sisteminde 3 numaralı bara hem salınım hem de generatör barası, 1, 2, ve 4 numaralı baralar generatör barası ve diğer 7 bara yük barasıdır. 7 ve 9 numaralı baralarda sabit empedans, sabit akım ve sabit aktif güç (ZIP) yük modeli kullanılmıştır. 8-9 numaralı iletim hatları arasında hat kopması oluşturmak amacıyla bir kesici bağlı durumda ve 8 numaralı barada ise üç faz hatası oluşturulmuş durumdadır.

## 5. Benzetim Çalışması Sonuçları

Benzetim çalışması sonuçları iki analizden oluşmaktadır. İlk analizde senkron generatörlerde herhangi bir denetleyici kullanılmadığı durum olurken, ikinci analizde senkron generatörlerde GSKK, OGD ve TY kullanıldığı durumlardan oluşmaktadır. Senkron generatörlerde herhangi bir denetleyicinin kullanılmadığı durumdaki bazı bara gerilimleri, senkron generatör aktif ve reaktif güç değişimleri şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Senkron generatörde denetleyicilerin olmadığı durumda elde edilen sonuçlar

Senkron generatörde denetleyicilerin olmadığı durumda elde edilen sonuçlar incelenecek olursa bara

gerilimleri, senkron generatör aktif ve reaktif güç değişimlerinin kararsız olduğu görülmektedir. Sistem



parametrelerinde geçici durum esnasında salınımların fazla olduğu tespit edilmiştir. Senkron generatörde

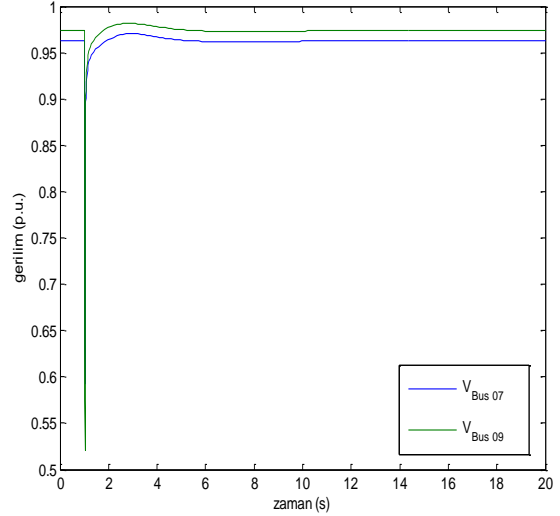
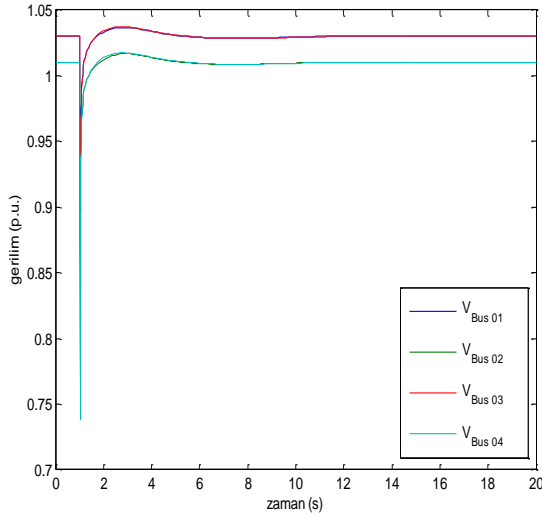
denetleyici kullanılmadığı durumdaki küçük sinyal kararlılığı sonuçları tablo 1'de gösterilmiştir.

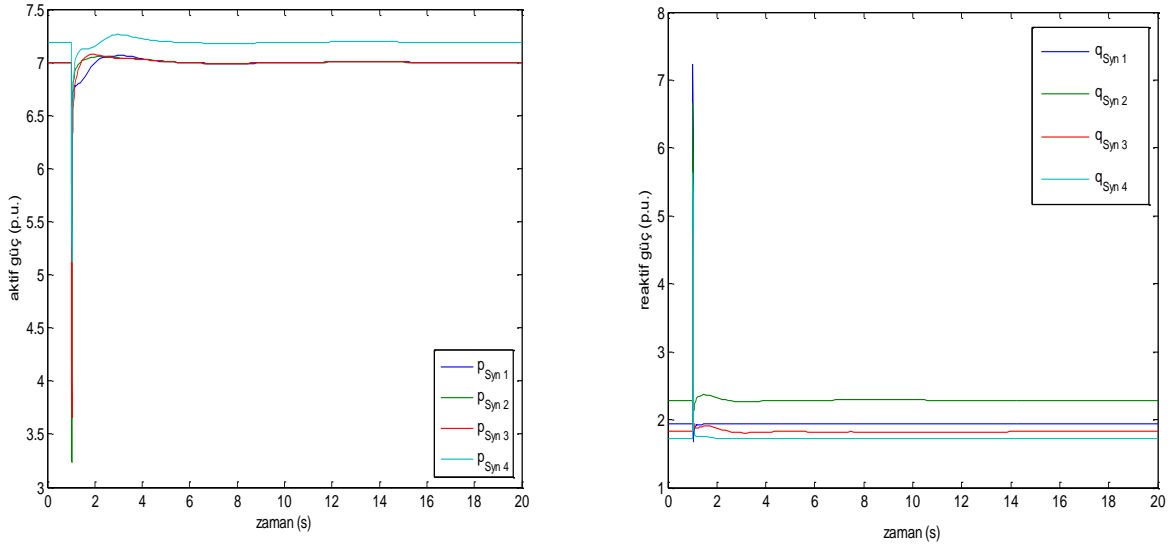
Tablo 1. Senkron generatörde denetleyicilerin kullanılmadığı durumdaki küçük sinyal kararlılığı sonuçları

Mod	Baskın Makineler	Özdeğerler	Osilasyon Frekansı (Hz)	Sönümlenme Oranı $\zeta$ (%)	Katılım Faktörü (%)
Bölgeler Arası Mod-1	G <sub>1</sub>	-0.56 ± 6.79	1.0819	8.237	$\delta_1=25.6$ $\omega_1=25.6$
Bölgeler Arası Mod-2	G <sub>2</sub>	-0.56 ± 6.61	1.0522	8.475	$\omega_2=24.8$ $\delta_2= 24.8$
Yerel Mod-1	G <sub>4</sub>	-0.12 ± 3.46	0.5511	3.598	$\omega_4=18.8$ $\delta_4= 18.8$

Osilasyon sönümlenme oranları %3 ile %8 arası düşük seviyelerde olmasından dolayı sistemde sönümlenemeyen kararsız salınımlar bulunmaktadır. İlk senaryoda katılım faktöründe en etkili ilişkili değişkenler bölgeler arası modda  $\delta_1$  ve  $\omega_1$  olup analize %25.6 oranında katılmışlardır fakat bu sönümlenme oranı salınımları sönümlenmek için yeterli olmamaktadır. Denetleyici modelleri kullanılmadığı durumda baskın makineler açısından incelendiğinde

generatör 1, generatör 2 ve generatör 4'ün geçici durumdan etkilendiği görülmektedir. Çalışma modu olarak generatör 1 ve generatör 2'de bölgeler arası mod, generatör 4 yerel modda çalışmaktadır. Bu çalışmadaki ikinci senaryoda senkron generatörde GSKK, OGD ve TY kullanıldığı durum analizi gerçekleştirilmiştir. GSKK, OGD ve TY kullanıldığı durumdaki bazı bara gerilimleri, senkron generatör aktif ve reaktif güç değişimleri şekil 3'de gösterilmiştir.





Şekil 3. Senkron generatörde denetleyicilerin olduğu durumda elde edilen sonuçlar

Senkron generatörde GSKK, OGD ve TY model denetleyicilerin olduğu durumda elde edilen sonuçlar incelenecek olursa bara gerilimleri, senkron generatör aktif ve reaktif güç değişimlerinin kararlı olduğu görülmektedir. Sistem parametrelerinde geçici durum

esnasında salınımların denetleyiciler sayesinde sönümlendiği tespit edilmiştir. Senkron generatörde denetleyicilerin kullanıldığı durumdaki küçük sinyal kararlılığı sonuçları tablo 2'de gösterilmiştir.

Tablo 2. Senkron generatörde denetleyicilerin kullanıldığı durumdaki küçük sinyal kararlılığı sonuçları

Mod	Baskın Makineler	Özdeğerler	Osilasyon Frekansı (Hz)	Sönümlenme Oranı $\zeta$ (%)	Katılım Faktörü (%)
Yerel Mod-1	G <sub>1</sub>	-1.784 ± j3.89	0.6205	41.623	$\delta_1 = 21.57$
Yerel Mod-2	G <sub>2</sub> , G <sub>3</sub>	-1.745 ± j3.85	0.6133	41.271	$\delta_2 = 20.72$
Yerel Mod-3	G <sub>4</sub> , G <sub>1</sub>	-1.075 ± j1.98	0.3154	47.694	$S_4 = 17.11$ $\delta_1 = 15.13$

Senkron generatörde GSKK, OGD ve TY modelleri ilave edildiğinde her generatör kendi bölgesinde ve kendi arasında kararlılığa katkı sağlayıp bölgeler arası mod da birbirleriyle etkileşime geçmediği gözlenmiştir. Katılım faktöründe en etkili ilişkili değişkenler bölgeler arası modda  $\delta_1$  olup analize %21.57 oranında katılmıştır. Osilasyon sönümlenme oranları % 41 ile % 48 arasında yüksek seviyelerde olmasından dolayı sistemde sönümlenme olmasından dolayı salınımlar azalmaktadır. Denetleyici modelleri kullanıldığı durumda baskın makineler açısından incelendiğinde generatör 1, generatör 2, generatör 3 ve generatör 4'ün geçici durumdan etkilendiği görülmektedir. Çalışma modu olarak tümünün yerel modda çalıştığı görülmektedir.

## 6. Sonuçlar

Güç sistemlerinde küçük sinyal kararlılığı analizi sistemin çalışma bölgesi, özdeğeri, salınım ile sönümlenme frekansları ve katılım faktörlerini detaylı olarak ortaya çıkarmaktadır. Bu çalışmada senkron generatörde denetleyicilerin kullanılmadığı durum ve kullanıldığı durum karşılaştırmaları yapılmış olup elde edilen sonuçlar detaylı olarak yorumlanmıştır. Sistemde denetleyicilerin kullanılması ile özdeğer sonuçlarının eksi sonsuza daha çok yaklaştığı görülmüştür. Buda sistemin kararlı hale geldiğini ortaya çıkarmaktadır. Senkron generatörlerde özellikle açılı ve açılma hız değerlerinin katılım faktörü içerisinde bulunduğu tespit edilmiştir. Salınımlar açısından da denetleyicilerin kullanılması ile sistemin kısa süre içerisinde kararlı hale geldiği ve salınımların

tamamının sönümlendiği görülmüştür. Çalışma modları açısından sistem değerlendirildiğinde denetleyicileri kullanılmadığı durumda hem bölgeler arası mod hem de yerel modda durumu oluşurken, denetleyicilerin kullanıldığı durumda yerel mod durumu oluşmaktadır. Bu çalışma ile literatürde yaygın olarak kullanılan GSKK ve OGR modellerine nazaran daha iyi sonuçların elde edildiği görülmektedir. Bu çalışma farklı test sistemlerinde senkron generatörlerde kullanılan denetleyiciler ile beraber yenilenebilir enerji kaynakları ve güç elektroniği tabanlı kompanzasyon sistemleri ile beraber kullanılmasına zemin hazırlamaktadır.

### Kaynaklar

- [1] Jia H, Yu X, Yu Y, Wang C. Power System Small Signal Stability Region with Time Delay, *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 30(1), 16-22, 2008.
- [2] Milano F. Small-Signal Stability Analysis of Large Power Systems with Inclusion of Multiple Delays, *IEEE Transactions on Power Systems*, 31(4), 3257-3266, 2015.
- [3] Salim RH, Ramos RA. A Model-Based Approach for Small-Signal Stability Assessment of Unbalanced Power Systems, *IEEE Transactions on Power Systems*, 27(4), 2006-2014, 2012.
- [4] Wang L, Semlyen A. Application of Sparse Eigenvalue Techniques to the Small Signal Stability Analysis of Large Power Systems, *IEEE Transactions on Power Systems*, 5(2), 635-642, 1990.
- [5] Kundur P, Rogers GJ, Wong DY, Wang L, Lauby MG. A Comprehensive Computer Program Package for Small Signal Stability Analysis of Power Systems, *IEEE Transactions on Power Systems*, 5(4), 1076-1083, 1990.
- [6] Rouco L, Perez-Arriaga IJ. Multi-area Analysis of Small Signal Stability in Large Electric Power Systems by SMA, *IEEE Transactions on Power Systems*, 8(3), 1257-1265, 1993.
- [7] Wang X, Yao R, Rao F. Three-Step Impedance Criterion for Small-Signal Stability Analysis in Two-Stage DC Distributed Power Systems, *IEEE Power Electronics Letters*, 1(3), 83-87, 2003.
- [8] Liu J, Feng X, Lee FC, Borojevich D. Stability margin monitoring for DC Distributed Power Systems Via Perturbation Approaches, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 18(6), 1254-1261, 2003.
- [9] Amin M, Molinas M. Small-Signal Stability Assessment of Power Electronics Based Power Systems: A Discussion of Impedance-and Eigenvalue-Based Methods, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 53(5), 5014-5030, 2017.
- [10] Angelidis G, Semlyen A. Improved Methodologies for The Calculation of Critical Eigenvalues in Small Signal Stability Analysis, *IEEE Transactions on Power Systems*, 11(3), 1209-1217, 1996.
- [11] Liu Z, Yao W, Wen J. Enhancement of Power System Stability Using A Novel Power System Stabilizer with Large Critical Gain, *Energies*, 10(4), 449, 2017.
- [12] Law KT, Hill DJ, Godfrey NR. Robust Controller Structure for Coordinated Power System Voltage Regulator and Stabilizer Design, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2(3), 220-232, 1994.
- [13] Quinot H, Bourles H, Margotin T. Robust Coordinated AVR+ PSS for Damping Large Scale Power Systems, *IEEE Transactions on Power Systems*, 14(4), 1446-1451, 1999.
- [14] Essallah S, Bouallegue A, Khedher A. Integration of Automatic Voltage Regulator and Power System Stabilizer: Small-Signal Stability in DFIG-Based Wind Farms, *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 7(5), 1115-1128, 2019.
- [15] Westinghouse G. Electrical Transmission and Distribution Reference, *Westinghouse Electric & Manufacturing Company*, 1942.
- [16] Milano F. An Open-Source Power System Analysis Toolbox, *IEEE Transactions on Power systems*, 20(3), 1199-1206, 2005.

Araştırma Makalesi/Research Article

## Ayrık dalgacık dönüşümü ve Xgboost ile rüzgâr gücü tahmini

Mehmet Ali YELGEÇ<sup>1</sup>, Okan BİNGÖL<sup>2</sup>\*

<sup>1,2</sup> Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 32260, Isparta, Türkiye

### Anahtar Kelimeler

Rüzgâr gücü  
Rüzgâr gücü tahmini  
Ayrık dalgacık dönüşümü  
Xgboost

### Makale geçmişi:

Geliş Tarihi: 20.06.2022

Kabul Tarihi: 19.09.2022

**Öz:** Rüzgâr gücü tahmini, sistem işletmecisi ve santraller için gerilim ve frekans kontrolü, yük kontrolü, ünite planlaması, bakım planlaması ve elektrik marketi hareketleri için gereklidir. Süreksiz bir kaynak olan rüzgârdan elde edilen güce ait zaman serisi durağan bir yapıda değildir. Rüzgâr gücü zaman serisi çeşitli sebeplerden dolayı aykırı veriler barındırmaktadır. Bu durum tahmin modellerinde başarıyı düşürmektedir. Bu çalışmada rüzgâr gücü tahmin modelinin en iyi sonucu vermesi için rüzgâr gücü verisi ayrık dalgacık dönüşümü ile dönüştürülmüştür. Dönüştürülen veriler, karar ağacı tabanlı, gradyan arttırmaya dayanan bir algoritma olan Xgboost ile eğitilmiştir. Test için ayrılan veriler tahmin edilmiştir. Ayrık dalgacık dönüşümü-Xgboost modeli her mevsimden seçilen dört ay için ayrı ayrı tasarlanmış, ayrık dalgacık dönüşümü olmadan sadece Xgboost ile tasarlanan model ile MAE, RMSE ve R<sup>2</sup> hata metrikleriyle karşılaştırılmıştır. Ayrık dalgacık dönüşümü-Xgboost ile tasarlanan modeller daha başarılı sonuçlar vermiştir.

### Atf için/To Cite:

Yelgeç M.A. Bingöl O. Ayrık dalgacık dönüşümü ve Xgboost ile rüzgâr gücü tahmini. Ulusallararası Teknolojik Bilimler Dergisi, 14(2), 58-65. 2022.

## Wind power forecasting with discrete wavelet transform and Xgboost

### Keywords

Wind power  
Wind power forecasting  
Discrete wavelet transform  
Xgboost

### Article history:

Received: 20.06.2022

Accepted: 19.09.2022

**Abstract:** Wind power forecasting is necessary for system operator and wind farm for voltage and frequency control, load dispatch, unit commitment, maintenance planning and electricity market actions. Wind power time series, which is a intermittent source, is not stationary and contains various outliers. This situation reduces the success of forecasting models. In order for the wind power forecasting model to give the best results, in this paper the wind power data was transformed with discrete wavelet transform. Transformed data were trained and forecasted with Xgboost, a decision tree based, gradient boosting algorithm. Proposed model were designed separately for a selected month from each season. These models were compared with MAE, RMSE, R<sup>2</sup> error metrics by the models designed with Xgboost without discrete wavelet transform. Discrete wavelet and Xgboost model gave more successful results than Xgboost model.

### 1. Giriş

Gelişmekte olan ülkeler arasında yer alan ülkemizde enerjiye olan ihtiyaç giderek artmaktadır. Bu ihtiyaca çözüm olması için artan elektrik santrali kurulu gücü çeşitli kaynaklardan oluşmaktadır. 2022 yılı Mart itibarıyla 100 000 MW'ı aşan kurulu gücün 10861 MW'ı rüzgâr santrallerinden oluşmaktadır [1]. Süreksiz ve dalgalı bir yapıya sahip olan rüzgâr enerjisi güç sistemi için stabil olmayan bir durum oluşturmaktadır. Rüzgâr gücü tahmini ile bu belirsizlik

azaltılarak rüzgâr gücünün güç sistemine entegrasyonu sağlanmaktadır. Rüzgâr santrallerinin üreteceği güç tahminini yapmak enerjide arz talep dengesini sağlamak için önemlidir ve doğru tahmin yapmak bu dengeyi sağlamak için gerekli olan rezerv gücü azaltmaktadır [2]. Rüzgâr gücü üretimi tahmini, santral ve sistem işletmecisi için üretim ve iletim bakım planı, sistem işletmesi için gerekli rezerv güç belirlenmesi, ünite programlaması, ekonomik dağıtım, enerji depolama optimizasyonu ve enerji ticareti gibi alanlarda kullanılmaktadır [3]. Kullanım amacına göre

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

rüzgâr gücü tahmini çok kısa, kısa, orta ve uzun süreli olarak yapılmaktadır.

Çok kısa süreli tahminler, şebeke dengesi işlemleri ve gerilim kontrolü için saniyelerden 30 dakikaya kadar zaman ufunda yapılır, kısa süreli tahminler, yük dağıtımı, yük atma ve alma, rezerv kararı, operasyonel güvenlik ve gün öncesi piyasa hareketleri, generator açma-kapama kararı için 30 dakikadan 1 güne kadar zaman ufunda yapılır, orta süreli tahminler ünite programlaması için bir günden 1 aya kadar zaman ufunda yapılır, uzun süreli tahminler bakım planlaması, rüzgâr santrali dizaynı, market analizi için birkaç aylık zaman ufunda yapılmaktadır [4].

Rüzgâr gücü tahmin yöntemleri fiziksel, istatistiksel ve hibrit olarak üçe ayrılmaktadır. Fiziksel yöntemler, havanın rüzgâr hızı, rüzgâr yönü, basınç, sıcaklık, nem, arazi yapısı gibi meteorolojik verileri kullanılarak yapılmaktadır [5]. Nümerik değerlerle rüzgâr tahmini yaparak rüzgâr karakteristiği belirlenerek potansiyel rüzgâr santralleri için alan belirlenmesi [6], geniş ölçekli hava tahmini modelinden verileri sağlayan fiziksel yöntemle rüzgâr gücü tahmini [7], rüzgâr santralinin geçmiş nümerik hava verileriyle kümeleme algoritmasıyla rüzgâr gücü tahmini [8] fiziksel yöntemle yapılan çalışmalardır. İstatistiksel yöntemler, zaman serisi ve yapay sinir ağları modeli olmak üzere ikiye ayrılır. Otoresif hareketli ortalama [9], otoresif bütünleşik hareketli ortalama [10], üstel düzleştirme [11] yöntemleri ile zaman serisi modelleri ile rüzgâr gücü tahmini yapılmıştır. Yapay sinir ağları ile rüzgâr gücü tahmin çalışmaları yapılmıştır [12], [13], [14], [15]. Farklı yöntemler birlikte kullanılarak hibrit rüzgâr gücü tahmin modelleri yapılmaktadır. Genetik algoritma ve uzun kısa süreli bellekle rüzgâr gücü tahmini [16], deneysel mod ayrıştırması ve yapay sinir ağlarıyla rüzgâr gücü tahmini [17], evrişimli sinir ağları ve radyal tabanlı yapay sinir ağları ile rüzgâr gücü tahmini [18] gibi farklı hibrit modeller tasarlanarak rüzgâr gücü tahmini çalışmaları yapılmıştır.

Süresiz bir yapıya sahip olan rüzgâr gücünün tahmin edilmesi iletim sistemi operatörü, santral işletmesi ve elektrik marketi için gereklidir. Rüzgâr türbinini rüzgârdan enerji üretebilmesi için rüzgâr hızının türbin yapısına göre değişen devreye girme ve devreden çıkma hızları arasında olmalıdır [19]. Rüzgâr hızının bu hızlar arasında olmasına rağmen veri hataları veya hava şartlarının ani değişimi gibi nedenlerden dolayı enerji üretimi gerçekleşmez ve bu durum rüzgâr gücü verisinde aykırı verilere neden olur. Aykırı veriler rüzgâr gücü tahmin algoritmalarının başarısını düşürmektedir. Bu çalışmada bu verilerin etkisini azaltmak için rüzgâr gücü verisi ayırık dalgacık dönüşümü ile ayrıştırılmıştır.

Daha sonra hız ve performans için tasarlanan makine öğrenmesi algoritması ekstrem gradyan artırma (Xgboost) ile her mevsimden seçilen bir ay için eğitilmiş, seçilen hata metrikleriyle test için ayrılan verilerle önerilen modelin başarısı ölçülmüştür. Literatürde genellikle ayrı ayrı ve farklı modellerle kullanılan ayırık dalgacık dönüşümü ve Xgboost algoritmasıyla hibrit bir model tasarlanarak rüzgâr gücü tahmininde başarılı sonuçlar verdiği gösterilmiştir.

Rüzgârdan elektrik enerjisi elde edilmesi için kullanılan ifadeler verilmiş, çalışma kapsamında kullanılan ayırık dalgacık dönüşümü ve ekstrem gradyan artırma (Xgboost) algoritması açıklanmıştır. Rüzgâr santralinin türbin anemometresinden elde edilen rüzgâr gücü verisiyle ayırık dalgacık dönüşümü-Xgboost modeli tasarlanıp seçilen aylara uygulanmıştır.

## 2. Rüzgâr dan Elektrik Enerjisi Elde Edilmesi

Rüzgâr türbinlerinin bıçakları vasıtasıyla hareket halindeki havanın kinetik enerjisi kullanılarak elektrik enerjisi elde edilir. Hareket halindeki hava kütlesi,  $p$  hava yoğunluğu,  $x$  kalınlığında,  $A$  kesitine sahip yüzeye etki etmesiyle Denklem 1'deki gibi hesaplanır.

$$m = pAx \quad (1)$$

Türbindeki hava kütlesinin hızı, kayıplar ihmal edilerek hava kütlesinin türbin bıçaklarına çarpmadan önceki ve çarptıktan sonraki hızlarının ortalaması olarak kabul edilirse rüzgârdan elde edilen enerji Betz Kanunu olarak da bilinen Denklem 2 ile hesaplanır [20].

$$P = 0.593 \frac{1}{2} pAV^3 \quad (2)$$

Bu denklemde  $p$  hava yoğunluğunu,  $A$  rüzgârın etki ettiği kesit alanını,  $V$  ise hava kütlesinin türbin bıçağına çarpmadan önceki hızını göstermektedir. Betz kanununa göre rotor bıçaklarına çarpan hava kütlesinin %59'u enerjiyi çevrilebilse de pratikte bu verim çok daha düşüktür. Bu kayıpların tümü  $C_p$  adlı bir katsayı ile ifade edilerek Denklem 2, Denklem 3 şeklinde yazılabilir.

$$P = C_p \frac{1}{2} pAV^3 \quad (3)$$

## 3. Ayrık Dalgacık Dönüşümü

Dalgacık dönüşümü dalgacık denilen fonksiyonlar yardımıyla zaman serilerini ayrıştırmada kullanılır. Ayrıştırmanın amacı verinin boyutunu küçültmek ve gürültüyü azaltmaktır. Zaman serileri dalgacık dönüşümü vasıtasıyla farklı boyut ve frekansta

bileşenlere ayrılır [21]. Sürekli dalgacık dönüşümü zaman ölçekli örnekleme yapar ancak farklı frekanslarda filtreleme yapan ayrık dalgacık dönüşümü daha etkili bir kullanıma sahiptir.

Sürekli dalgacık dönüşümü,  $W(a,b)$  katsayısı orijinal sinyal ( $f(x)$ ) ile ayrıştırılmış ana dalgacık uyumunu gösterecek şekilde,  $\phi(x)$  ana dalgacı gösterirken Denklem 4'te gösterilmiştir. Ölçek parametresi  $a$  dalgacık genişliğini kontrol ederken  $b$  parametresi merkezi belirler.

$$W(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \phi\left(\frac{x-b}{a}\right) dx \quad (4)$$

Sürekli dalgacık dönüşümü, ana dalgacı sürekli ölçeklendirirken gereksiz bilgiler de oluşturur bu durumun önüne geçmek için sürekli ölçeklendirmek yerine belirli bir ölçek ve pozisyon kullanılarak ayrık dalgacık dönüşümü olarak bilinen daha etkili yöntem kullanılabilir. Ayrık dalgacık dönüşümü genellikle ikinin kuvveti temel alınarak kullanılır. Bu durum Denklem 5'te gösterilmiştir [22].

$$W(m,n) = 2^{-(m/2)} \sum_{t=0}^{T-1} f(t) \phi\left(\frac{t-n.2^m}{2^m}\right) \quad (5)$$

Rüzgâr gücü üretimi, rüzgâr hızı, rüzgâr yönü, hava yoğunluğu, hava basıncı, türbin kayıpları gibi birçok doğal faktörlerden etkilenir ve süresiz ve durağan olmayan bir zaman serisi oluşur. Bu zaman serisi farklı frekanslarda bileşenler içerir. Bunlar düşük frekanslı bileşenler ve yüksek frekanslı bileşenlerdir [23]. Zaman serisi düşük ve yüksek frekans filtresinden geçerek yaklaşım (A) ve ayrıtma (D) katsayıları oluşur. Yaklaşım katsayısı yüksek ölçek ve düşük frekans, ayrıtma katsayısı ise düşük ölçek yüksek frekanslı bileşenlerdir. Genel kanı düşük frekanslı yaklaşım verisi orijinal veriye benzer bir seriyi ifade ederken, yüksek frekans ayrıtma verisi küçük değişikliklerle orijinal veriyi temsil eder ve her ikisi de önemlidir [24].

#### 4. Xgboost

Xgboost denetimli öğrenme problemleri için verilerin eğitim ve test için ayrılarak kullanılan bir algoritmadır. Xgboost gradyan arttırmaya dayanır, etkili ve ölçeklenebilirdir [25]. Karar ağacı tabanlı algoritmalar optimize edilerek geliştirilmiştir. Temelindeki fikir kayıp fonksiyonunu olabildiğince azaltarak daha iyi bir karar ağacı oluşturmaktır. Böylece diğer alternatiflerine göre daha etkili ve çözüme daha hızlı ulaşır [26].

Xgboost daha iyi bir karar ağacı oluşturarak amaç fonksiyonunu minimize etmeyi amaçlar. Xgboost çalışma prensibi Denklem 6 ve 7'de gösterilmiştir.  $L(\theta)$   $\hat{y}_i$  ile  $y_i$  değerleri arasındaki kayıp fonksiyonu,  $\Omega(\theta)$

düzenleme terimi,  $\gamma$  öğrenme katsayısı,  $T$  ağaçtaki yaprak sayısı,  $\lambda$  düzenleme katsayısı,  $w$  ise yaprakların ağırlıklarını ifade etmektedir.

$$F_{amac} = L(\theta) + \Omega(\theta) \quad (6)$$

$$L(\theta) = l(\hat{y}_i, y_i), \quad \Omega(\theta) = \gamma T + \frac{1}{2} \lambda \|w\|^2 \quad (7)$$

#### 4. Rüzgâr Tahmini Uygulaması

Bu çalışmada Türkiye'nin güneybatısında bulunan bir rüzgâr santraline ait 1 yıllık 10 dakikalık çözünürlükteki türbin anemometre verileri kullanılmıştır. Her mevsimden bir ay seçilerek hepsi için ayrı ayrı tahminler yapılmıştır. Verilerin ilk %80'i modelin eğitimi için kullanılmış kalan kısmı modelin testi için kullanılmıştır.

Test için ayrılan veriler MAE (Mean absolute error), RMSE (Root mean squared error) ve  $R^2$  (Coefficient of determination) hata metrikleriyle ölçülmüştür. Denklem 8 MAE, Denklem 9 RMSE, Denklem 10 ise  $R^2$  metriklerinin çalışma prensiplerini göstermektedir.

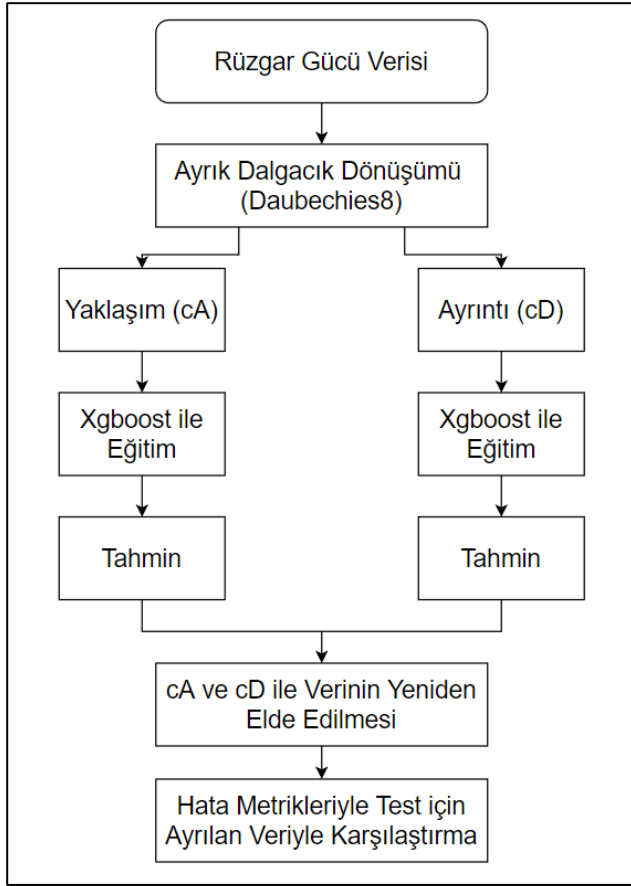
$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |y_i - \hat{y}| \quad (8)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y})^2} \quad (9)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (y_i - \hat{y})^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2} \quad (10)$$

Süresiz bir kaynak olan rüzgârdan elde edilen gücün zaman serisi durağan değildir ve birçok aykırı veriden oluşmaktadır. Rüzgâr türbinleri güç üretimini belli rüzgâr hızları arasında yapmaktadır. Güç üretilen en düşük hıza devreye girme hızı, güvenlik için sınırlandırılan üretimin gerçekleştirildiği maksimum hıza devreden çıkma hızı denir. Devreye girme ve devreden çıkma hızları arasında türbinin güç üretmesi beklenirken çeşitli etkenlerden dolayı verilerde bu hızlar dışında da üretim gerçekleştiği görülmektedir. Bu nedenden dolayı rüzgâr gücü verisini ayrık dalgacık dönüşümü ile gürültüden ayırmak tahmin için daha doğru sonuçlar verecektir. Şekil 1'de önerilen modelin yapısı gösterilmiştir.





Şekil 1. Ayırık dalgacık dönüşümü-Xgboost modeli yapısı

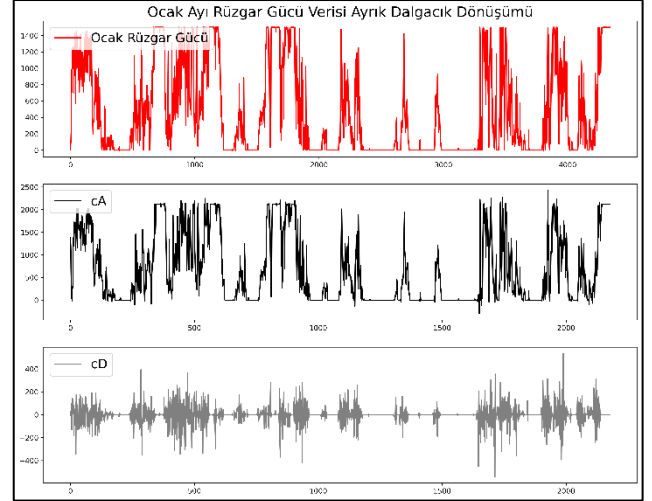
Rüzgâr gücü verisi, ayırık dalgacık dönüşümü ile yaklaşım ve ayrıntı dizilerine ayrılmış, bu verilerin eğitim için ayrılan ilk %80'lik kısmı ile model, Xgboost algoritması ile Tablo 1'de verilen hiperparametrelere göre t-6, t-5, t-4, t-3, t-2, t-1 verileriyle t zaman adımı tahmin edecek şekilde eğitilmiştir. Daha sonra her bir dizi eski haline dönüştürülüp test için ayrılan verinin %20'lik kısmıyla seçilen hata metrikleri vasıtasıyla karşılaştırılmıştır. Önerilen bu model yine farklı hiperparametreler denenerek en iyi sonucu verdiği görülen Tablo 1'deki hiperparametrelerle tasarlanmış ancak dalgacık dönüşümü olmadan direkt Xgboost algoritmasıyla tasarlanan modelle karşılaştırılmıştır.

Tablo 1. Xgboost için seçilen hiperparametreler

Hiperparametre	Değer
n_estimators	1000
learning_rate	0.01
max_depth	4
min_child_weight	3
subsample	0.5

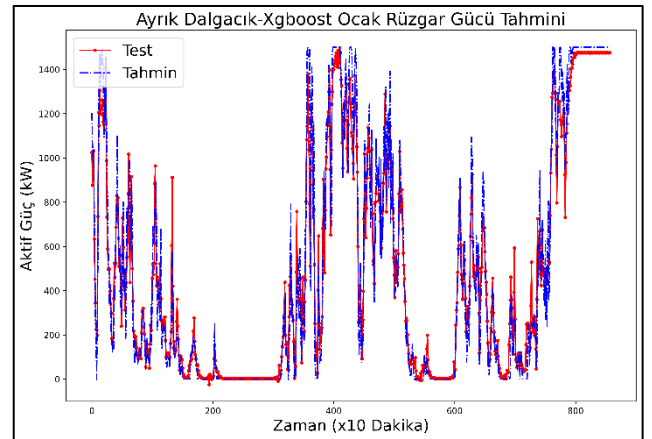
Kış mevsimi için seçilen Ocak ayı rüzgâr gücü verisi ve ayırık dalgacık dönüşümü sonrası oluşan yaklaşım ve ayrıntı katsayılarının grafikleri Şekil 2'de

görülmektedir. 10 dakikalık çözünürlükteki bu veri cA ve cD dizilerine ayrılmış ve bu diziler eğitim için belirlenen oranla Xgboost ile eğitilmiştir. Sonraki aşama olarak test için ayrılan veriler tahmin edilmiş ve rüzgâr gücü verisi eski haline döndürülerek orijinal verile karşılaştırılmıştır.

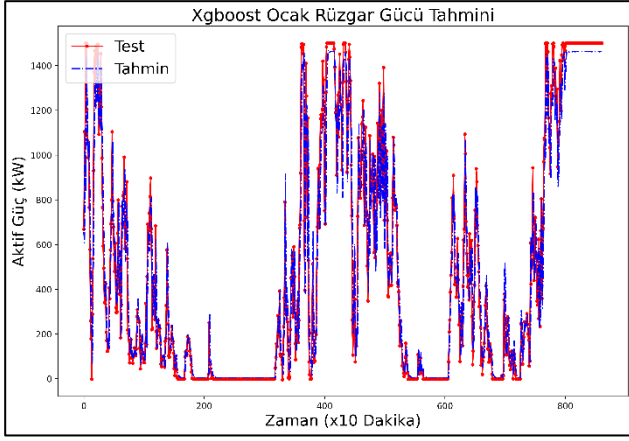


Şekil 2. Ocak rüzgâr gücü verisi

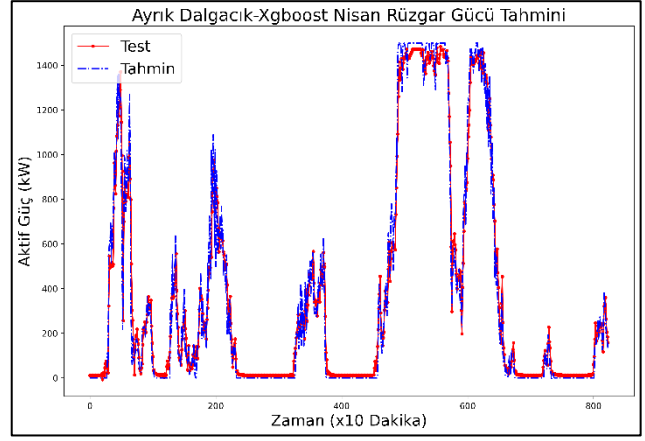
Şekil 3'te ayırık dalgacık dönüşümü ve Xgboost algoritmasıyla tasarlanan modelin test için ayrılan verilerin tahmini ve gerçek değerleri karşılaştırılırken, Şekil 4'te rüzgâr verisine herhangi bir işlem uygulanmadan direkt Xgboost ile eğitilerek tahmin ve gerçek değerler karşılaştırılmıştır. İlk model için MAE, RMSE ve R<sup>2</sup> değerleri sırasıyla 72.32, 112.99 ve 0.96 şeklinde gerçekleşirken ikinci model için sırasıyla 97.40, 158.28 ve 0.91 olarak gerçekleşmiştir. Bu durumda Ocak ayı için ayırık dalgacık dönüşümü ve Xgboost ile tasarlanan model daha başarılı sonuçlar vermiştir.



Şekil 3. Add-Xgboost Ocak rüzgâr gücü tahmini



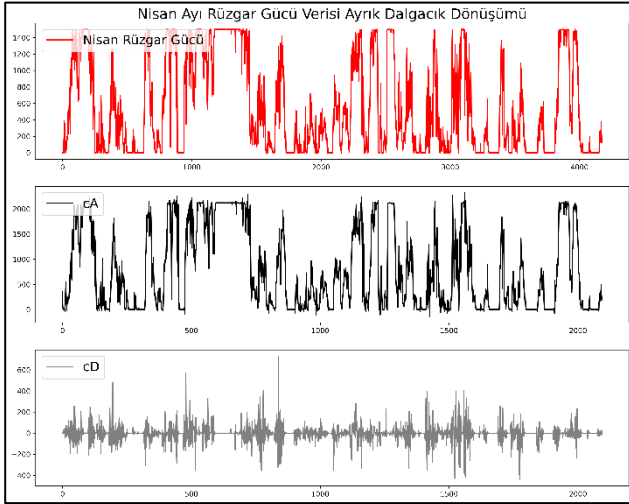
Şekil 4. Xgboost Ocak rüzgâr gücü tahmini



Şekil 6. Add-Xgboost Nisan rüzgâr gücü tahmini

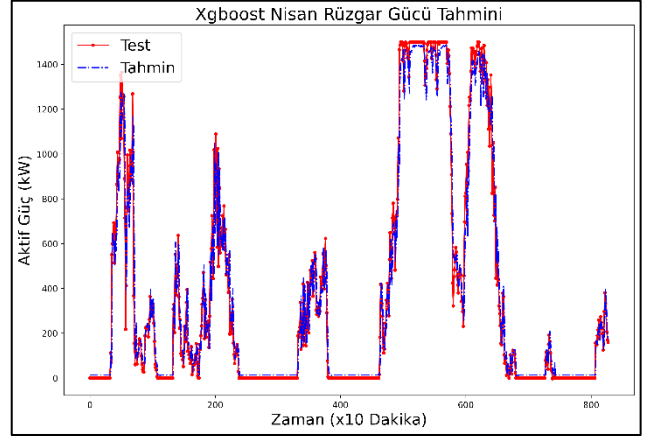
Kış mevsiminden Ocak ayı için tasarlanan modeller örnek olacak şekilde ilkbahar için Nisan, yaz için Temmuz ve sonbahar için Kasım ayı seçilerek aynı modeller aynı hiperparametreler ile aynı oranda eğitim ve test için ayrılarak tasarlanmış ve yine aynı hata metrikleriyle karşılaştırılmıştır.

Nisan ayı için rüzgâr gücü verisi ve ayrık dalgacık dönüşümü sonrası oluşan yaklaşım ve ayrıntı katsayılarının grafikleri Şekil 5'te görülmektedir.



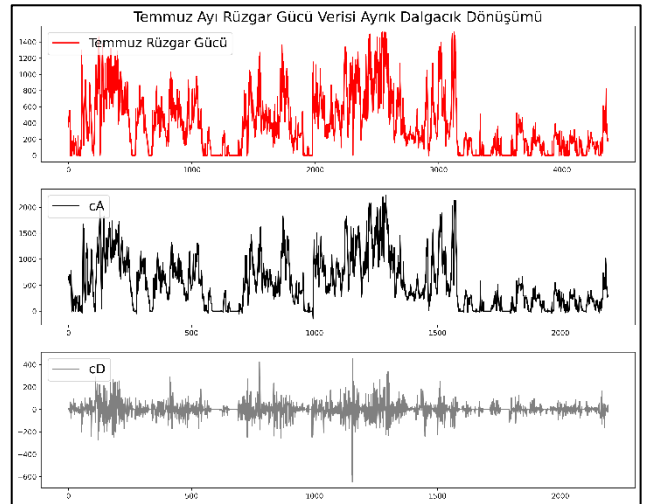
Şekil 5. Nisan rüzgâr gücü verisi

Şekil 6'da Nisan için ayrık dalgacık dönüşümü ve Xgboost modeli Şekil 7'de ise Xgboost modeli ile tasarlanan modelin tahmin grafikleri gösterilmiştir. İlk model için MAE, RMSE ve  $R^2$  değerleri sırasıyla 50.26, 78.14 ve 0.98 şeklinde gerçekleşirken ikinci model için sırasıyla 60.88, 104.77 ve 0.96 olarak gerçekleşmiştir. Bu durumda Nisan ayı için ayrık dalgacık dönüşümü ve Xgboost ile tasarlanan model daha başarılı sonuçlar vermiştir.



Şekil 7. Xgboost Nisan rüzgâr gücü tahmini

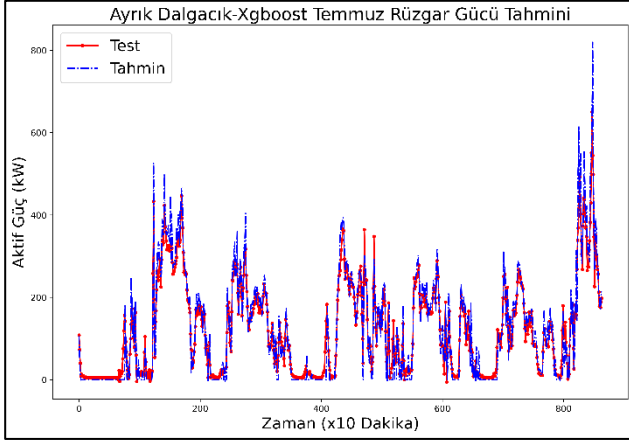
Temmuz ayı için rüzgâr gücü verisi ve ayrık dalgacık dönüşümü sonrası oluşan yaklaşım ve ayrıntı katsayılarının grafikleri Şekil 8'de görülmektedir.



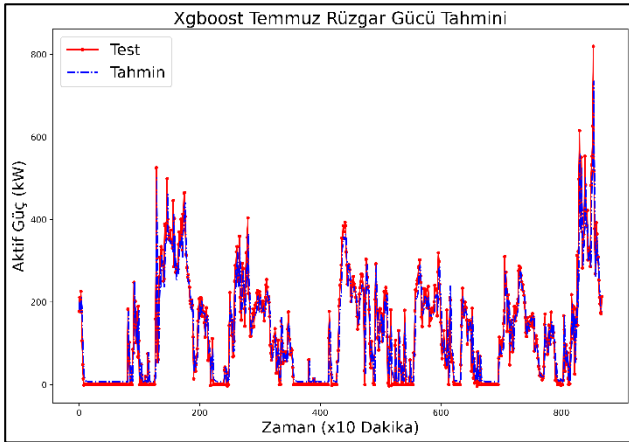
Şekil 8. Temmuz rüzgâr gücü verisi

Şekil 9'da Temmuz için ayrık dalgacık dönüşümü ve Xgboost modeli Şekil 10'da ise Xgboost modeli ile tasarlanan modelin tahmin grafikleri gösterilmiştir. İlk

model için MAE, RMSE ve  $R^2$  değerleri sırasıyla 23.85, 35.45 ve 0.92 şeklinde gerçekleşirken ikinci model için sırasıyla 34.28, 52.98 ve 0.83 olarak gerçekleşmiştir. Bu durumda Temmuz ayı için ayırık dalgacık dönüşümü ve Xgboost ile tasarlanan model daha başarılı sonuçlar vermiştir.

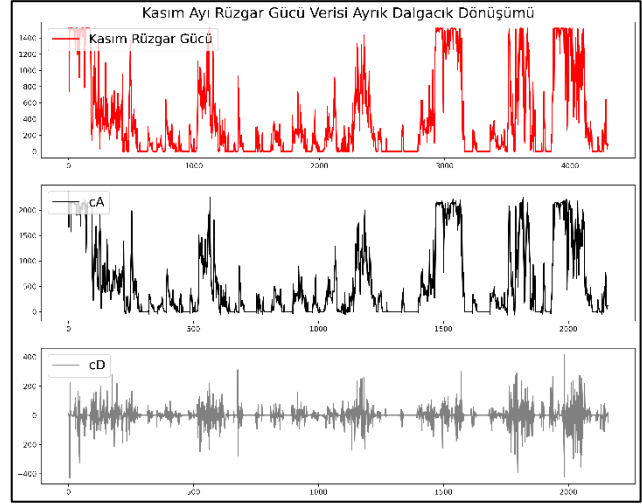


Şekil 9. Add-Xgboost Temmuz rüzgâr gücü tahmini



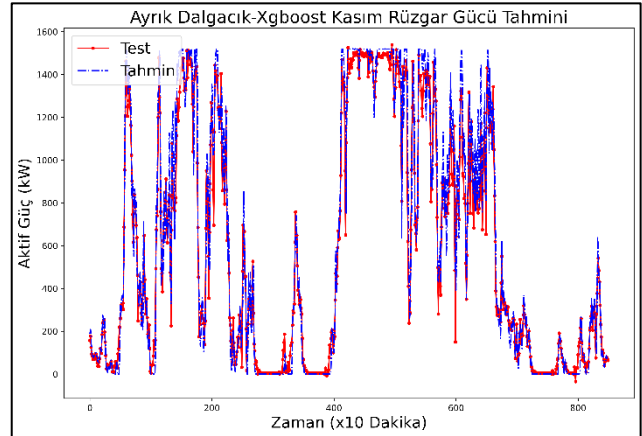
Şekil 10. Xgboost Temmuz rüzgâr gücü tahmini

Kasım ayı için rüzgâr gücü verisi ve ayırık dalgacık dönüşümü sonrası oluşan yaklaşım ve ayrıntı katsayılarının grafikleri Şekil 11'de görülmektedir.

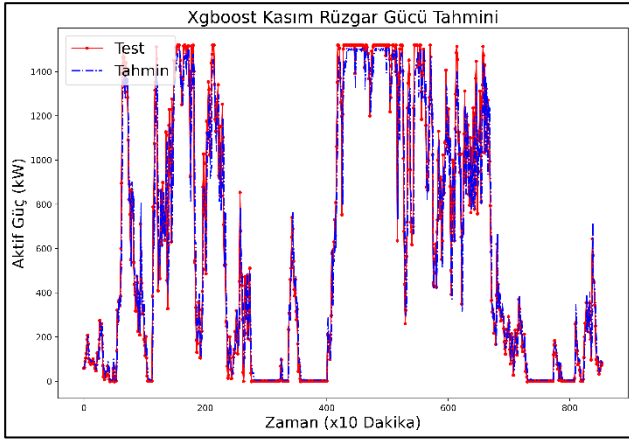


Şekil 11. Kasım rüzgâr gücü verisi

Şekil 12'de Kasım için ayırık dalgacık dönüşümü ve Xgboost modeli Şekil 13'te ise Xgboost modeli ile tasarlanan modelin tahmin grafikleri gösterilmiştir. İlk model için MAE, RMSE ve  $R^2$  değerleri sırasıyla 72.70, 111.10 ve 0.96 şeklinde gerçekleşirken ikinci model için sırasıyla 93.39, 150.94 ve 0.93 olarak gerçekleşmiştir. Bu durumda Kasım ayı için ayırık dalgacık dönüşümü ve Xgboost ile tasarlanan model daha başarılı sonuçlar vermiştir.



Şekil 12. Add-Xgboost Kasım rüzgâr gücü tahmini



Şekil 13. Xgboost Kasım rüzgâr gücü tahmin

Her mevsimden seçilen aylara ait hata metriklerini Tablo 2’de gösterilmiştir. Ayrık dalgacık dönüşümü ile birlikte Xgboost kullanılan model seçilen her ayda daha başarılı sonuç vermiştir.

Tablo 2. Modellerin karşılaştırılması

Aylar	Model	MAE	RMSE	R <sup>2</sup>
Ocak	ADD-Xgboost	72.32	112.99	0.96
	Xgboost	97.40	158.28	0.91
Nisan	ADD-Xgboost	50.26	78.14	0.98
	Xgboost	60.88	104.77	0.96
Temmuz	ADD-Xgboost	23.85	35.45	0.92
	Xgboost	34.28	52.98	0.83
Kasım	ADD-Xgboost	72.70	111.10	0.96
	Xgboost	93.39	150.94	0.93

#### 4. Sonuçlar

Sürekli bir kaynak olan rüzgârdan elde edilen güce ait zaman serisi durağan değildir ve çeşitli nedenlerden dolayı aykırı veriler oluşmaktadır. Karar ağacı temelli olan Xgboost algoritmasıyla her mevsimden seçilen bir aya ait 10 dakika zaman ufunda tahmin yapmadan önce bu verinin ayırık dalgacık dönüşümü ile ayrıştırılıp daha sonra Xgboost algoritması ile tahmin yapılması yalnız Xgboost algoritması ile tahmin yapılmasına göre seçilen dört ayda da MAE, RMSE ve R<sup>2</sup> hata metrikleriyle karşılaştırılmış ve ayırık dalgacık dönüşümü-Xgboost modelinin daha başarılı sonuçlar verdiği görülmüştür.

Bu çalışma farklı sinyal işleme teknikleri kullanılarak geliştirilebileceği gibi farklı makine ve derin öğrenme algoritmalarıyla tasarlanıp karşılaştırılabilir. Seçilen modeller farklı eğitim algoritmaları ve optimizasyon algoritmalarıyla tasarlanıp başarıları karşılaştırılabilir.

#### Kaynaklar

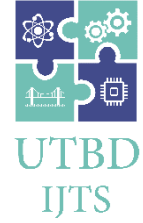
- [1] Türkiye Elektrik İlerim A.Ş. Kurulu Güç Raporu Mart 2022. <https://www.teias.gov.tr/tr-TR/kurulu-guc-raporlari> (Erişim Tarihi: 27.04.2022).
- [2] Foley AM, Leahy PG, Marvuglia A, McKeogh EJ. Current methods and advances in forecasting of wind power generation. *Renewable Energy*, 37(1), 1-8, 2012.
- [3] Monteiro C, Bessa R, Miranda V, Botterud A, Wang J, Conzelmann G. Wind power forecasting: state-of-the-art. *Decision and Information Sciences*, 2009.
- [4] Santhosh, M., Venkaiah, C., & Vinod Kumar, D. M. (2020). Current advances and approaches in wind speed and wind power forecasting for improved renewable energy integration: A review. *Engineering Reports*, 2(6), e12178.
- [5] Potter CW, Negnevitsky M. Very short-term wind forecasting for Tasmanian power generation. *IEEE Transactions on Power Systems*, 21, (2), 965-972, 2006.
- [6] Nor KM, Shaaban M, Rahman HA. Feasibility assessment of wind energy resources in Malaysia based on NWP models. *Renewable Energy*, 62, 147-154, 2014.
- [7] Focken U, Lange M, Waldl H.-P.H.-P. Previento-A Wind Power Prediction System with an Innovative Upscaling Algorithm. In *Proceedings of the European Wind Energy Conference (EWEC)*, Copenhagen, Denmark, pp. 1-4, 2011.
- [8] Zhang Y, Li Y, Zhang G. Short-term wind power forecasting approach based on Seq2Seq model using NWP data. *Energy*, 213, 118371, 2020.
- [9] Wang J, Zhou Q, Zhang X. Wind power forecasting based on time series ARMA model. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science Vol. 199, No. 2*, p. 022015. IOP Publishing, 2018.
- [10] Yatiyana E, Rajakaruna S, Ghosh A. Wind speed and direction forecasting for wind power generation using ARIMA model. In *2017 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)* (pp. 1-6). IEEE, 2017.
- [11] Kusiak A, Zhang Z. Short-horizon prediction of wind power: A data-driven approach. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 25(4), 1112-1122, 2010.
- [12] Durán MJ, Cros D, Riquelme J. Short-term wind power forecast based on ARX models. *J. Energy Eng.* 133, 172-180, 2007.
- [13] Firat U, Engin SN, Sarcalar M, Ertuzum AB. Wind Speed Forecasting Based on Second Order Blind Identification and Autoregressive Model. In *Proceedings of the 2010 Ninth International*

- Conference on Machine Learning and Applications, Washington, DC, USA, 12–14, pp. 686–691, 2010.
- [14] Bilal B, Ndongo M, Adjallah KH, Sava A, Kebe CMF, Ndiaye PA, Sambou V. Wind turbine power output prediction model design based on artificial neural networks and climatic spatiotemporal data. In Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology 2018, Lyon, France, pp. 1085–1092, 2018.
- [15] Hong YY, Rioflorido CLPP. A hybrid deep learning-based neural network for 24-h ahead wind power forecasting. *Appl. Energy*, 250, 530–539, 2019.
- [16] Shahid F, Zameer A, Muneeb M. A novel genetic LSTM model for wind power forecast. *Energy*, 223, 120069, 2021.
- [17] Du P, Wang J, Yang W, Niu T. A novel hybrid model for short-term wind power forecasting. *Applied Soft Computing*, 80, 93–106, 2019.
- [18] Hong YY, Rioflorido CLPP. A hybrid deep learning-based neural network for 24-h ahead wind power forecasting. *Appl. Energy*, 250, 530–539, 2019.
- [19] Lydia M, Kumar S, Selvakumar A. A comprehensive review on wind turbine power curve modeling techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 452–460, 2014.
- [20] Shepherd W, Zhang L. *Electricity Generation Using Wind Power*. World Scientific, 2011.
- [21] Liu Y, Guan L, Hou C, Han H, Liu Z, Sun Y, Zheng M. Wind power short-term prediction based on LSTM and discrete wavelet transform. *Applied Sciences*, 9(6), 1108, 2019.
- [22] Catalão JDS, Pousinho HMI, Mendes VMF. Short-term wind power forecasting in Portugal by neural networks and wavelet transform. *Renewable energy*, 36(4), 1245–1251, 2011.
- [23] Chaovalit P, Gangopadhyay A, Karabatis G, Chen Z. Discrete wavelet transform-based time series analysis and mining. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 43(2), 1–37, 2011.
- [24] Wang W, Shi Y, Lyu G, Deng W. Electricity consumption prediction using Xgboost based on discrete wavelet transform. *DEStech Trans. Comput. Sci. Eng.*, 2017.
- [25] Chen T, Guestrin C. Xgboost: A scalable tree boosting system. In Proceedings of the 22nd acm sigkdd international conference on knowledge discovery and data mining (pp. 785–794), 2016.
- [26] Demolli H, Dokuz AS, Ecemis A, Gokcek M. Wind power forecasting based on daily wind speed data using machine learning algorithms. *Energy Conversion and Management*, 198, 111823, 2019.



# Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi

## International Journal of Technological Sciences



Araştırma Makalesi/Research Article

### Güç sistemlerinde çoklu SVC kullanımı ile statik gerilim kararlılığının iyileştirilmesi

M. Kenan DÖŞOĞLU<sup>ID</sup>\*1, Enes KAYMAZ<sup>ID</sup>2, Muhammet DEMİRBAŞ<sup>ID</sup>3

<sup>1,2</sup>Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Düzce, Türkiye

<sup>3</sup>Beykent Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

#### Anahtar Kelimeler

SVC  
Maksimum yüklenme parametresi  
Bara gerilim profilleri  
Aktif-reaktif güç değişimleri

#### Makale geçmişi:

Geliş Tarihi: 20.07.2022

Kabul Tarihi: 22.10.2020

**Öz:** Günümüzde Esnek AC İletim Sistemleri (FACTS) elemanları yük merkezlerinde yerel olarak reaktif güç desteği sağlamak ve dolayısıyla bara gerilimleri güvenli çalışma sınırları içinde tutmaktadır. Özellikle de paralel FACTS cihazlarının tekli kullanımı yüklenme durumlarına göre sistemin güvenli çalışma durumlarını iyileştiremeyebilir. Bu yüzden paralel FACTS cihazlarının hem yüksek maliyetlerinden kaçınmak hem de sistemdeki uygun yerlerinin tespit edilmesi önemli bir konu olmaktadır. Bunun için paralel FACTS cihazlarından birisi olan Statik Var Kompansatör (SVC) kullanılmaktadır. Bu çalışmada, 3 makinalı 9 baralı güç sisteminde SVC'nin farklı yük baralarında çoklu kullanılması ile çok makinalı sistemin maksimum yüklenme parametresi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Dahası bara gerilim profilleri ve aktif-reaktif güç üzerindeki değişimleri detaylı olarak incelenmiştir. Bu çalışmada, üç analiz yöntemi kullanılmıştır. Bunlar SVC'nin olmadığı durum, SVC'nin tekli kullanıldığı durum ve SVC'nin çoklu kullanıldığı durumlardır. Bu benzetim çalışması için Güç Sistemleri Analizi Programı (PSAT) tercih edilmiştir. Yapılan çalışma sonucunda çoklu SVC kullanımının diğerlerine göre maksimum yüklenme parametresi değerini arttırdığı, bara gerilim profillerini ve aktif-reaktif güç değişimlerini iyileştirdiği görülmüştür.

#### Atf için/To Cite:

Döşoğlu M. K. Kaymaz E. Demirbaş M. Güç sistemlerinde çoklu SVC kullanımı ile statik gerilim kararlılığının iyileştirilmesi. Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi, 14(2), 66-74, 2022.

### Enhancement of static voltage stability using multiple SVC in power systems

#### Keywords

SVC  
Maximum loading parameter  
Bus-voltage profiles  
Active-reactive power changes

#### Article history:

Received: 20.07.2022

Accepted: 22.10.2022

**Abstract:** Today, Flexible AC Transmission Systems (FACTS) devices provide local reactive power support in load centers and keep bus voltages within safe operating limits. In particular, the single use of parallel FACTS devices may not improve the safe operating conditions of the system depending on the load conditions. Therefore, avoiding parallel FACTS devices' high costs is crucial and determining their optimal places in the system. For this, Static Var Compensator (SVC), one of the parallel FACTS devices, is used. This study investigated the effects of multiple uses of SVC on different load buses on the maximum load parameter of the multi-machine system in a 3-machine 9-bus power system. Moreover, bus-voltage profiles and their changes in active-reactive power are studied in detail. In this study, three analysis methods were used. These are the no SVC, the single use of SVC, and the multiple uses of SVC. The Power Systems Analysis Program (PSAT) was preferred for this simulation study. As a result of the study, using multiple SVCs increases the maximum loading parameter value and improves the bus-voltage profiles and active-reactive power changes compared to others.



## 1. Giriş

Modern güç sistemlerine karmaşık yapıda olması ve artan talep durumlarından dolayı kararlılık problemleri ortaya çıkmaktadır. Kararlılık problemlerini ortadan kaldırmak için güç elektroniği tabanlı kompanzasyon sistemleri tercih edilmektedir [1]. FACTS cihazları olarak isimlendirilen bu güç elektroniği tabanlı kompanzasyon sistemleri içerisinde, bara gerilimini reaktif güce bağlı olarak kontrol eden ve maliyet açısından daha ekonomik olan SVC yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. SVC ile literatürde yapılan bir çok çalışma bulunmaktadır. Çok makinalı güç sisteminde kısa devre oluşması durumunda sistemdeki bara gerilimlerini kompanze etmek ve oluşan salınımların kısa süre içerisinde sönümlenmesini sağlamak için SVC kullanılmaktadır. Dahası SVC'nin kullanımı ile bara gerilim profillerinde iyileşmeler olmaktadır [2, 3]. Çok baralı güç sistemlerinde geçici durumlar ve salınımların sönümlenmesi durumlarını daha iyi koordine etmek için generatör uyarıtımı ve SVC birlikte tercih edilmektedir. Geri beslemeli doğrusallaştırma tekniği sayesinde generatör uyarıtımı ve SVC'nin geçici kararlılık ve salınımlar üzerinde etkili olduğu görülmektedir [4,5]. Senkron generatörlerde geçici kararlılık durumlarında uyarıtım modellerinin yanı sıra güç sistem kararlı kılıcısı modelleri de yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Güç sistem kararlı kılıcısı modeli ile SVC'nin birlikte koordineli olarak çalışmasında hem küçük sinyal kararlılığı açısından hem de açı kararlılığı açısından baskın olduğu ilgili çalışmalarda vurgulanmaktadır [6, 7]. SVC'nin güç sistemlerinde kullanım alanlarından biriside durum kestirim tahminleyicisidir. Sistemin dinamik çalışmasından dolayı oluşabilecek kararsızlık durumlarına karşı SVC'nin özellikle de elektromanyetik salınımlara karşı etkili olduğu görülmektedir [8]. Lineer olmayan yük modellerinin sebep olduğu harmoniklerin minimum düzeye indirilmesinde SVC tercih edilmektedir. Frekans mertebesine göre akım ve gerilim toplam harmonik bozunumlarının azaltılmasında SVC kullanımının önemli olduğu ilgili çalışmalarda gösterilmiştir [9, 10]. Güç akışı ve optimal yük akışı problemlerinin çözümlenmesinde SVC yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bara admitans modelinde paralel kapasite yerine tetikleme açısına bağlı olarak SVC'nin reaktör ya da kapasitör kullanılması ile sistem için uygun olan durumlar belirlenmektedir. Hem yük akışı hem de optimal yük akışında SVC kullanımı ile bara gerilimleri, açı, aktif-reaktif güç değerleri belirlenirken, kayıpların da azaldığı görülmektedir [11, 12]. Yük akışı ve optimal yük akışının yanı sıra, gerilim kararlılığı analizlerinde SVC sürekli yük akışında da tercih edilmektedir. Baraların güvenli çalışma limitleri arttırmak SVC kullanılmaktadır. Bara gerilimleri ile yüklenme parametresi arasındaki ilişkiyi çeşitli

çalışma koşullarına göre belirlemede SVC kullanımının etkili olduğu ilgili çalışmalarda görülmektedir [13-15].

Tekli SVC kullanımı ile bara gerilim profili ve maksimum yüklenme parametre değeri artmaktadır. Ancak dinamik yapılı sistemlerde özellikle büyük yüklerin devreye girip çıkması gerilim kararlılığını olumsuz yönde etkileyebilir, Bu yüzden sistemin yüklenabilirliğini daha çok arttırmak, çalışma koşullarını daha iyi hale getirmek ve bara gerilim profilini istenilen sınırlar içerisinde tutmak için çoklu SVC'nin kullanılması düşünülmektedir. 9 baralı güç sisteminde gerilim-maksimum yüklenme parametresi, bara gerilim açıları, aktif-reaktif güç değişimleri detaylı olarak incelenmiş olup, elde edilen sonuçların etkili olduğu görülmektedir.

## 2. Statik Gerilim Kararlılığı

Statik gerilim kararlılığı başlıca reaktif güç dengesi ile ilişkilidir. Reaktif güç desteği baranın ve dolayısıyla tüm sistemin yüklenabilirliğini sınırlayabilir. Reaktif güç desteği maksimum limit olan sınıra yaklaştığında sistem aktif ve reaktif güç kayıpları nedeniyle maksimum yüklenme noktasına veya gerilim çökme noktasına yaklaşacaktır. Buna göre güç iletimi ile ilgili problemlerden kaçınmak için reaktif güç desteklerinin yerel ve yeterli olması istenmektedir. Statik gerilim kararlılığında güç sistemindeki adım adım oluşan değişiklikler gerilim düşmesine ve reaktif güç azalmasına sebep olmaktadır. Bu olay aktarılan güce karşılık alıcı uçlarındaki gerilim grafiğinden elde edilmektedir. Güç aktarımı arttıkça alıcı uçlardaki gerilim azalır. Her ikisinin kesişim noktası yani kritik nokta elde edilir. Sistemde kritik noktaya ulaşmadan önce büyük reaktif güç kayıplarından kaynaklanan büyük gerilim düşüşü gözlemlenebilir. Sistemin reaktif gücünün tükendiği noktadan önce artırılabilir maksimum yüklenme sistemin statik gerilim kararlılığı indekslerini ortaya çıkarmaktadır. Sistemi gerilim çökmesinden kurtarmanın tek yolu ise iletim sistemindeki reaktif güç kayıplarını azaltmak veya gerilim çökme noktasına ulaşmadan önce ilave reaktif güç eklemektir. Özellikle de sistemin çalışma durumuna göre reaktif güç eklenmesi Paralel FACTS cihazları ile sağlanmaktadır [16-18]. Sistemdeki aktif-reaktif güç ayarlamasında yüklenme parametresine bağlı olarak yapılması gerekmektedir. Aktif-reaktif güç ve yüklenme parametresi ilişkisi denklem 1 ve denklem 2'de gösterilmiştir.

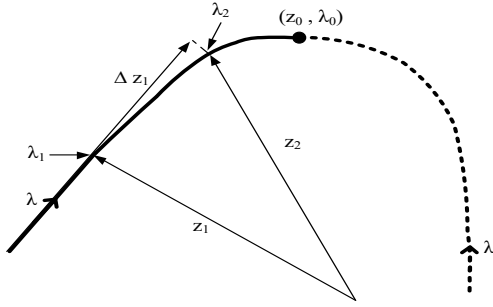
$$P_L = P_{L0}(1 + \lambda) \quad (1)$$

$$Q_L = Q_{L0}(1 + \lambda) \quad (2)$$

burada,  $P_{L0}$  ve  $Q_{L0}$  başlangıç aktif ve reaktif güç değerleri,  $P_L$  ve  $Q_L$  yükün aktif ve reaktif güç değerleri,  $\lambda$  maksimum yüklenme parametre değeridir. Statik

gerilim kararlılığı hesaplamasında sürekli yük akışı kullanılmaktadır. Sürekli yük akışında bara gerilimlerinin yüklenme parametresi arasındaki ilişki irdelenmektedir. Sürekli yük akışındaki hesaplaması Şekil 1'de gösterilmiştir.

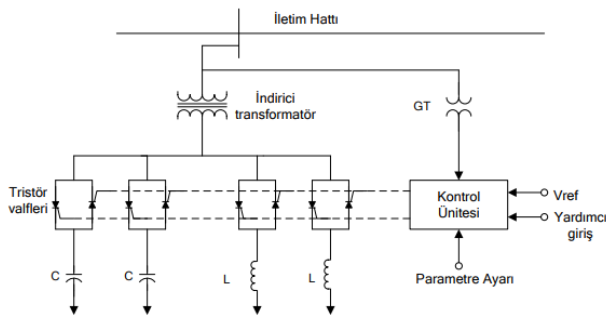
Şekil1'de,  $(z_1, \lambda_1)$  denge noktaları olarak bilinen durumdur,  $\Delta z_1$  sistem parametre değerinin değişmesi ve  $\Delta z_1$  vektör çözümlenmesinde kullanılmaktadır. İlk adımda tahmin etme işlemi yapılmaktadır. Başlangıç olarak  $z_1 + \Delta z_1$ ,  $\lambda_1 + \Delta \lambda_1$ , değerleri üretilmektedir. Bu üretilen değerler sistem profilindeki  $z_2 + \Delta z_2$  yeni denge noktalarını düzenlemek için kullanılır [19, 20].



Şekil 1. Sürekli Yük Akışı Hesaplaması

### 3. Statik Var Kompanzator (SVC)

Statik Var Kompanzator (SVC) paralel olarak kullanılan FACTS cihazlarından birisidir. SVC sabit bir kapasitör bankasına paralel olan tristör grupları tarafından kontrol edilen reaktörler ve kapasitörlerden oluşur. Bir indirici transformator aracılığıyla baraya paralel olarak bağlanır. SVC'nin devre modeli Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. SVC Devre Modeli

SVC modelde gerilim kontrolünü elde etmek için paralel bağlantılı değişken süseptans kullanılmaktadır. Süseptans modeli iki şekilde gösterilmektedir. Bunlar SVC süseptansı ( $B_{SVC}$ ) ve eşdeğer süseptans ( $B_{eq}$ ) modelidir. SVC süseptansı otomatik olarak gerilim kontrolünü ayarlarken, eşdeğer süseptans bobin ve kondansatör devresindeki tristörleri tetikleme amaçlı

kullanılmaktadır. Eşdeğer süseptans hesaplaması denklem 3'te gösterilmiştir.

$$B_{eq} = B(\alpha) + B_C \quad (3)$$

Burada,  $B(\alpha)$  ve  $B_C$  ifadesinin genişletilmiş hali denklem 4 ve denklem 5'de gösterilmiştir.

$$B(\alpha) = -\frac{1}{wL} \left(1 - \frac{2\alpha}{\pi} - \frac{\sin(2\alpha)}{\pi}\right) \quad (4)$$

$$B_C = wC \quad (5)$$

Tristörlerin tetikleme açısı 0 ile 90 derece arasında olmaktadır. Eğer SVC tarafından tüketilen aktif gücün 0 olduğu varsayılırsa buna bağlı olarak SVC aktif güç ( $P_{SVC}$ ) ve SVC reaktif güç ( $Q_{SVC}$ ) ifadeleri denklem 6 ve denklem 7'deki gibi olmaktadır.

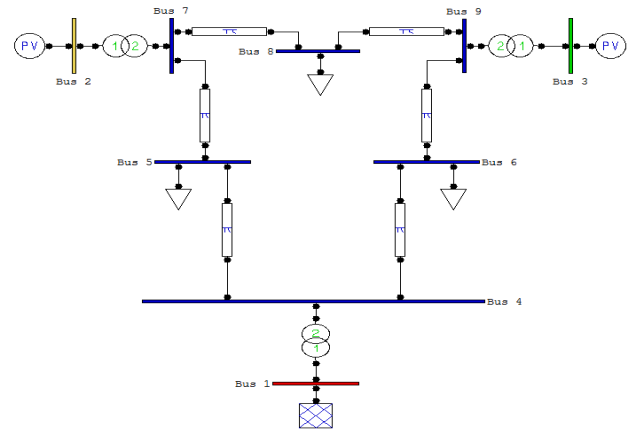
$$P_{SVC} = 0 \quad (6)$$

$$Q_{SVC} = -V^2 B_{SVC} \quad (7)$$

Burada,  $V$  bara gerilim genlik değeridir. Baradaki reaktif güç talebi değiştiğinden süseptans limitlere bağlı olarak değişmektedir. Ancak reaktif güç bara geriliminin karesinin bir fonksiyonudur. Bu yüzden de gerilim azaldıkça üretilen reaktif güç azalmaktadır [21].

### 4. Benzetim Çalışması

Yapılan bu çalışmada 9 baralı güç sistemi kullanılmıştır. Bu çalışma için Güç Sistemleri Analizi Programı (PSAT) tercih edilmiştir. 9 baralı güç sistemi devre modeli Şekil 3'te verilmiştir.



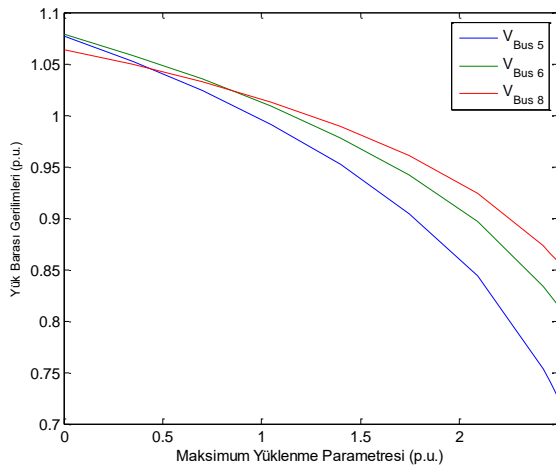
Şekil 3. 9 baralı güç sistemi devre modeli

9 baralı güç sisteminde 1 adet salınım barası, 2 adet generatör barası ve 3 adet yük barası kullanılmıştır. 9 baralı sistemin 2-7 ve 3-9 iletim hatları arasında

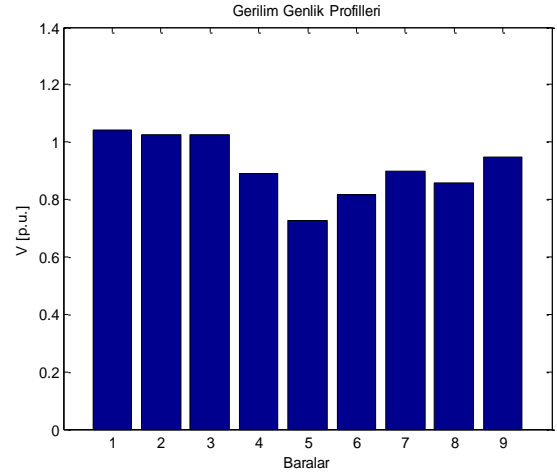
transformatör kullanılmaktadır. Bu sistemde 6 adet iletim hattı kullanılmaktadır. İletim hatları 4-5, 4-6 5-7, 7-8, 8-9 ve 6-9 numaralı baralar arasında kullanılmaktadır. Analiz 3 aşamadan oluşmaktadır. İlk analizde Sistemde SVC'nin olmadığı duruma göre sürekli yük akışı analizi uygulanmış olup, maksimum yüklenme parametresi elde edilmiştir. İkinci analizde ise tekli SVC'nin yük akışı sonucunda bara gerilim profili en düşük olan yük barasına bağlanması ile gerilim-maksimum yüklenme parametresi arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Üçüncü analiz olarak edn düşük gerilim profiline sahip barada SVC'nin yanısıra diğer yük baralarına sırayla bağlanan SVC ile çoklu durum için gerilim-maksimum yüklenme parametresi arasındaki ilişkiler detaylı olarak incelenmiştir.

#### 4.1. Benzetim çalışması sonuçları

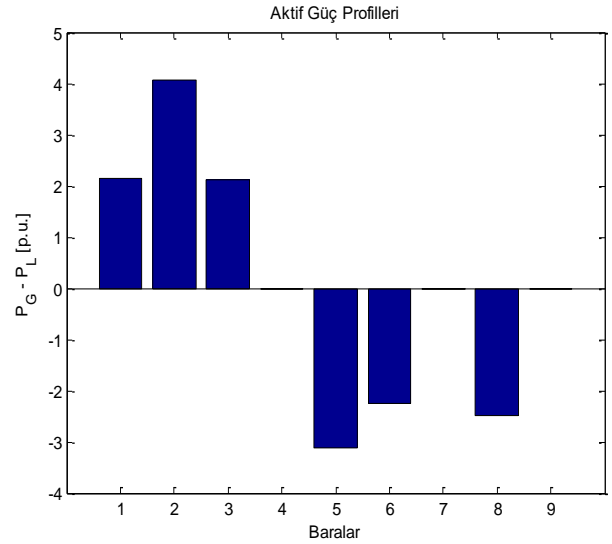
Yapılan çalışmanın ilk analizinde SVC'nin 9 baralı güç sisteminde kullanılmadığı durum incelenmiştir. Sistemin maksimum yüklenme parametre değerinin hesaplanması için öncelikle 9 baralı güç sisteminde yük akışı analizi yapılmıştır. Yük akışı analizi sonucuna göre 5, 6 ve 8 numaralı baraların gerilim genlik değerlerinin en düşük olduğu belirlenmiştir. Sistemin maksimum yüklenme parametre değerleri sürekli yük akışı metoduna göre bulunmuştur. SVC'nin kullanılmadığı durumda sistemin maksimum yüklenme parametre değeri 2.4933 olarak elde edilmiştir. 100 MVA'lık SVC'nin kullanılmadığı durumdaki gerilim-maksimum yüklenme parametre ilişkisi, baraların gerilim genlik profilleri, üretilen ve yük baralarındaki aktif-reaktif güç dengesinden elde edilen sonuçlar Şekil 4 - Şekil 7 arasında gösterilmiştir.



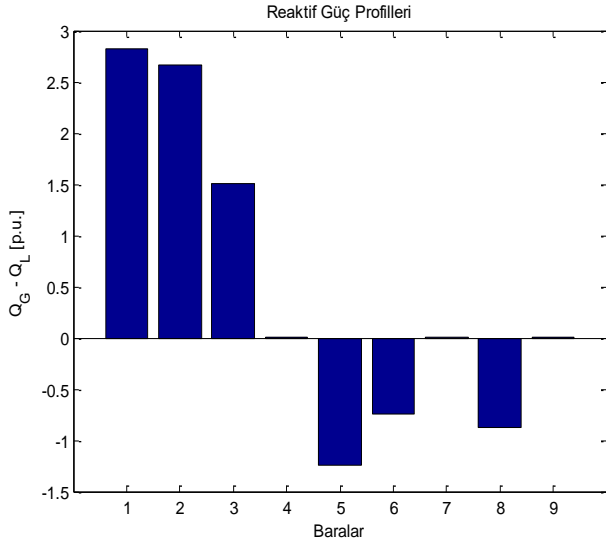
Şekil 4. SVC'nin kullanılmadığı durumdaki gerilim-maksimum yüklenme parametre ilişkisi,



Şekil 5. SVC'nin kullanılmadığı durumdaki baraların gerilim genlik profilleri



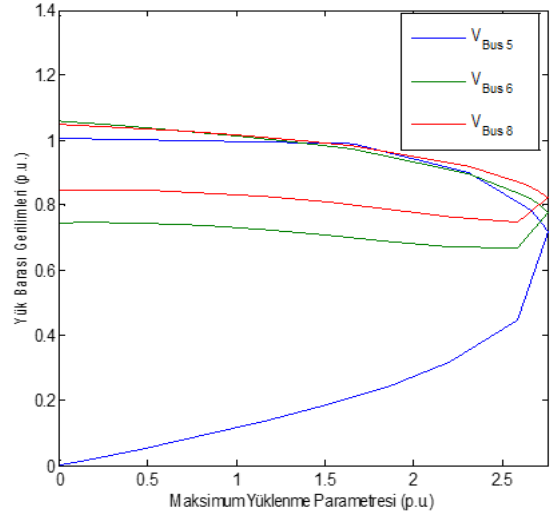
Şekil 6. SVC'nin kullanılmadığı durumdaki üretilen ve yük baralarındaki aktif güç değerleri



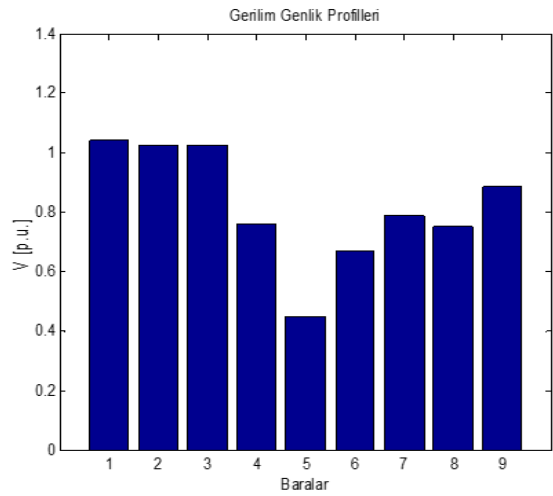
**Şekil 7.** SVC'nin kullanılmadığı durumdaki üretilen ve yük baralarındaki reaktif güç değerleri

SVC'nin kullanılmadığı durumda sürekli yük akışı sonucuna göre 4 numaralı bara 0.89176 pu, 5 numaralı bara 0.72619 pu, 6 numaralı bara 0.8151 pu, 7 numaralı bara 0.8976 pu, 8 numaralı bara 0.85824 pu ve 9 numaralı bara 0.94683 pu olmaktadır. Generatör ve Yük baraları arasındaki aktif güç farkları 1 numaralı barada 2.1389 pu, 2 numaralı barada 4.064 pu, 3 numaralı barada 2.1193 pu, 5 numaralı barada -3.1166 pu, 6 numaralı barada -2.2439 pu, 8 numaralı barada -2.4933 pu, 4, 7 ve 9 numaralı baralarda 0 pu olarak hesaplanmıştır. Generatör ve Yük baraları arasındaki reaktif güç farkları 1 numaralı barada 2.8112 pu, 2 numaralı barada 2.6614 pu, 3 numaralı barada 1.5034 pu, 5 numaralı barada -1.2466 pu, 6 numaralı barada -0.74798 pu, 8 numaralı barada -0.87264 pu, 4, 7 ve 9 numaralı baralarda 0 pu olarak hesaplanmıştır.

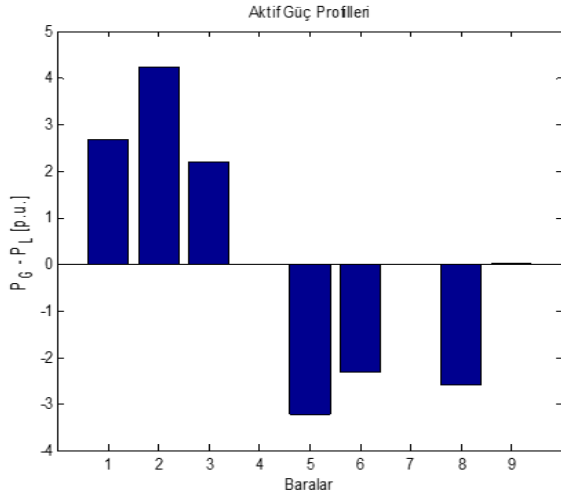
5, 6 ve 8 numaralı bara gerilimleri içerisinde yük akışı sonucuna göre en düşük gerilim profiline sahip bara 5 numaralı baradır. 100 MVA gücündeki SVC'nin 5 numaralı baraya bağlanması ile yüklenme parametresi, değeri 2.7562 olarak elde edilmiştir. Buna bağlı olarak gerilim-maksimum yüklenme parametresi ilişkisi, baraların gerilim genlik profilleri, üretilen ve yük baralarındaki aktif-reaktif güç dengesinden elde edilen sonuçlar Şekil 8-Şekil 11 arasında gösterilmiştir.



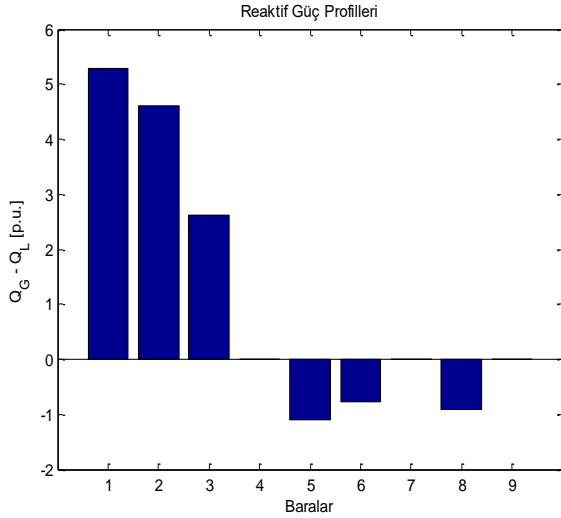
**Şekil 8.** SVC'nin 5 numaralı baraya bağlı olduğu durumdaki gerilim-maksimum yüklenme parametre ilişkisi



**Şekil 9.** SVC'nin 5 numaralı baraya bağlı olduğu durumdaki baraların gerilim genlik profilleri



**Şekil 10.** SVC'nin 5 numaralı baraya bağlı olduğu durumdaki üretilen ve yük baralarındaki aktif güç değerleri

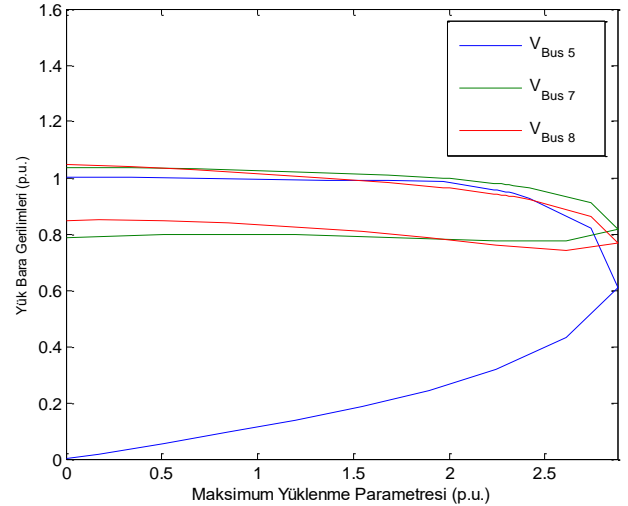


**Şekil 11.** SVC'nin 5 numaralı baraya bağlı olduğu durumdaki üretilen ve yük baralarındaki reaktif güç değerleri

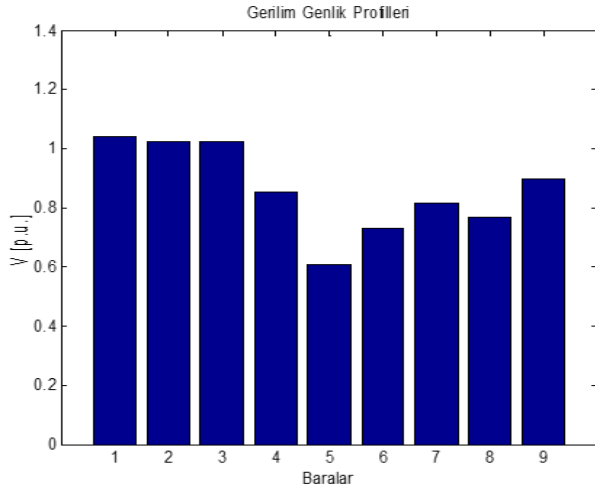
SVC'nin 5 numaralı barada kullanıldığı durumda sürekli yük akışı sonucuna göre 4 numaralı bara 0.76114 pu, 5 numaralı bara 0.44806 pu, 6 numaralı bara 0.66906 pu, 7 numaralı bara 0.78649 pu, 8 numaralı bara 0.74913 pu ve 9 numaralı bara 0.88456 pu olmaktadır. Generatör ve yük baraları arasındaki aktif güç farkları 1 numaralı barada 2.6763 pu, 2 numaralı barada 4.6187 pu, 3 numaralı barada 2.1966 pu, 5 numaralı barada -3.2302 pu, 6 numaralı barada -2.3202 pu, 8 numaralı barada -2.5842 pu, 4, 7 ve 9 numaralı baralarda 0 pu olarak hesaplanmıştır. Generatör ve yük baraları arasındaki reaktif güç farkları 1 numaralı barada 5.298 pu, 2 numaralı barada

4.6187 pu, 3 numaralı barada 2.6132 pu, 5 numaralı barada -1.0913 pu, 6 numaralı barada -0.77525 pu, 8 numaralı barada -0.90446 pu, 4, 7 ve 9 numaralı baralarda 0 pu olarak hesaplanmıştır.

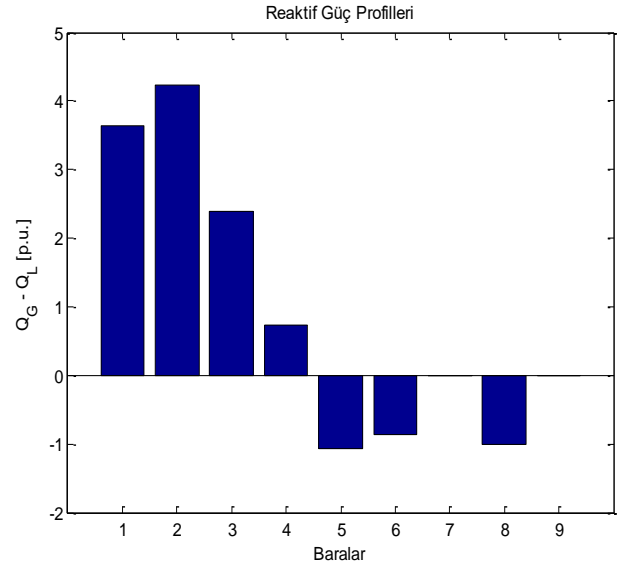
SVC'nin ikili yani çoklu kullanılması için 9 baralı güç sisteminde 4 ve 5 numaralı baralara, 5 ve 8 numaralı baralar, 5 ve 7 numaralı baralara 100 MVA gücünde SVC bağlanmıştır. Son senaryo içerisinde yapılan karşılaştırmalarda 5 ve 7 numaralı baralarda 100 MVA'lık SVC'lerin bağlanması ile maksimum yüklenme parametresi 2.83 olarak hesaplanmıştır. 5 ve 8 numaralı baralara 100 MVA'lık SVC'lerin bağlanması ile maksimum yüklenme parametresi 2.8473 olarak hesaplanmıştır. 4 ve 5 numaralı baralara 100 MVA'lık SVC'lerin bağlanması ile maksimum yüklenme parametresi 2.8778 olarak hesaplanmıştır. 100 MVA'lık SVC'nin 4 ve 5 numaralı baralarda çoklu kullanıldığı durumdaki gerilim-maksimum yüklenme parametre ilişkisi, baraların gerilim genlik profilleri, üretilen ve yük baralarındaki aktif-reaktif güç dengesinden elde edilen sonuçlar Şekil 12-Şekil 15 arasında gösterilmiştir.



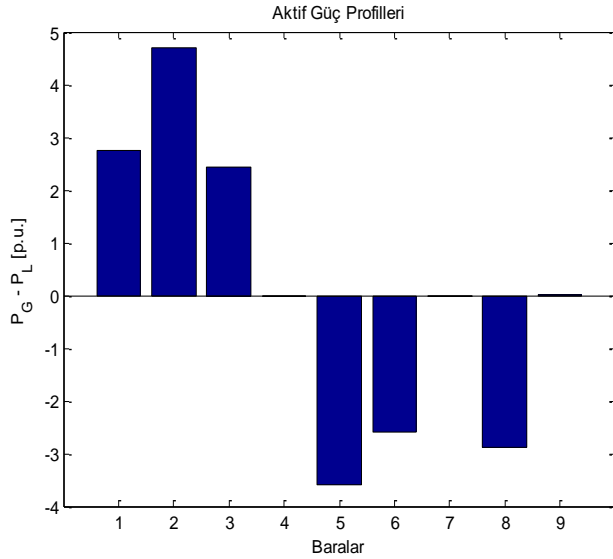
**Şekil 12.** SVC'nin 4 ve 5 numaralı baralarda çoklu kullanıldığı durumdaki gerilim-maksimum yüklenme parametre ilişkisi



**Şekil 13.** SVC'nin 4 ve 5 numaralı baralarda çoklu kullanıldığı durumdaki baraların gerilim genlik profilleri



**Şekil 15.** SVC'nin 4 ve 5 numaralı baralarda çoklu kullanıldığı durumdaki üretilen ve yük baralarındaki reaktif güç değerleri



**Şekil 14.** SVC'nin 4 ve 5 numaralı baralarda çoklu kullanıldığı durumdaki üretilen ve yük baralarındaki aktif güç değerleri

SVC'nin 4 ve 5 numaralı barada kullanıldığı durumda sürekli yük akışı sonucuna göre 4 numaralı bara 0.85169 pu, 5 numaralı bara 0.60858 pu, 6 numaralı bara 0.73125 pu, 7 numaralı bara 0.81868 pu, 8 numaralı bara 0.76709 pu ve 9 numaralı bara 0.89985 pu olmaktadır. Generatör ve yük baraları arasındaki aktif güç farkları 1 numaralı barada 2.7428 pu, 2 numaralı barada 4.6908 pu, 3 numaralı barada 2.4461 pu, 5 numaralı barada -3.5973 pu, 6 numaralı barada -2.59 pu, 8 numaralı barada -2.8778 pu, 4, 7 ve 9 numaralı baralarda 0 pu olarak hesaplanmıştır. Generatör ve yük baraları arasındaki reaktif güç farkları 1 numaralı barada 3.6467 pu, 2 numaralı barada 4.2298 pu, 3 numaralı barada 2.3804 pu, 4 numaralı barada 0.725375 pu, 5 numaralı barada -1.0685 pu, 6 numaralı barada -0.86334pu, 8 numaralı barada -1.0072 pu, 7 ve 9 numaralı baralarda 0 pu olarak hesaplanmıştır.

## 5. Sonuçlar

Bu çalışmada, çok baralı güç sisteminde SVC'nin kullanılmadığı, tekli kullanıldığı ve çoklu kullanıldığı durumdaki gerilim-maksimum yüklenme parametresi ve aktif-reaktif güç değişimleri detaylı olarak incelenmiştir. SVC ile 9 baralı sistemde öncelikle yük akışı yapılarak düşük gerilime sahip bara gerilim profilleri belirlenmiş olup, daha sonraki analizlerde sürekli yük akışı analizleri gerçekleştirilmiştir. SVC'nin tekli kullanıldığı durum, maksimum yüklenme parametresinin kullanılmadığı duruma göre daha iyi sonuç vermiştir. Ancak tekli SVC'nin kullanımında bara gerilim profilleri ve aktif-reaktif güç değişimlerinde



azalmaların olduğu görülmektedir. Bunu tolere etmek için SVC'nin çoklu kullanımına ihtiyaç duyulmuştur. SVC'nin çoklu kullanımı ile hem SVC'nin kullanılmadığı durum hem de SVC'nin tekli kullanımına göre maksimum yüklenme parametresi artmış olup, bara gerilim ve aktif-reaktif güç profillerinde iyileşmeler gözlemlenmiştir. Bu çalışma ile farklı çok baralı güç sistemlerinde değişik FACTS cihazlarının çoklu kullanılması ile yeni senaryo yaklaşımlarının yapılmasına zemin hazırlanmaktadır.

## Kaynaklar

- [1] Singh, B., & Agrawal, G. (2018). Enhancement of voltage profile by incorporation of SVC in power system networks by using optimal load flow method in MATLAB/Simulink environments. *Energy Reports*, 4, 418-434.
- [2] Cong, L., Wang, Y., & Hill, D. J. (2005). Transient stability and voltage regulation enhancement via coordinated control of generator excitation and SVC. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 27(2), 121-130.
- [3] Kumar, A., & Dubey, S. B. (2013). Enhancement of transient stability in transmission line using SVC facts controller. *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*, 2(2).
- [4] Cong, L., Wang, Y., & Hill, D. J. (2004). Co -ordinated control design of generator excitation and SVC for transient stability and voltage regulation enhancement of multi - machine power systems. *International Journal of Robust and Nonlinear Control: IFAC - Affiliated Journal*, 14(9 - 10), 789-805.
- [5] Wang, Y., Tan, Y. L., & Guo, G. (2000). Robust nonlinear coordinated generator excitation and SVC control for power systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 22(3), 187-195.
- [6] Bian, X. Y., Geng, Y., Lo, K. L., Fu, Y., & Zhou, Q. B. (2015). Coordination of PSSs and SVC damping controller to improve probabilistic small-signal stability of power system with wind farm integration. *IEEE Transactions on Power Systems*, 31(3), 2371-2382.
- [7] Kamari, N. A. M., Musirin, I., & Ibrahim, A. A. (2020). Swarm intelligence approach for angle stability improvement of PSS and SVC-based SMIB. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 15(3), 1001-1014.
- [8] Zhijun, E., Fang, D. Z., Chan, K. W., & Yuan, S. Q. (2009). Hybrid simulation of power systems with SVC dynamic phasor model. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 31(5), 175-180.
- [9] Das, S., Chatterjee, D., & Goswami, S. K. (2018). Tuned - TSC based SVC for reactive power compensation and harmonic reduction in unbalanced distribution system. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 12(3), 571-585.
- [10] Shawon, M. H., Hanzelka, Z., & Dziadecki, A. (2015, June). Voltage-current and harmonic characteristic analysis of different FC-TCR based SVC. In *2015 IEEE Eindhoven PowerTech* (pp. 1-6). IEEE.
- [11] Ambriz-Perez, H., Acha, E., & Fuerte-Esquivel, C. R. (2000). Advanced SVC models for Newton-Raphson load flow and Newton optimal power flow studies. *IEEE transactions on power systems*, 15(1), 129-136.
- [12] Rao, B. V., Kumar, G. N., Priya, M. R., & Sobhan, P. V. S. (2009, December). Optimal power flow by Newton method for reduction of operating cost with SVC models. In *2009 International Conference on Advances in Computing, Control, and Telecommunication Technologies* (pp. 468-470). IEEE.
- [13] Kamarposhti, M. A., & Lesani, H. (2009). Effects of Parallel Facts Controllers On Steady State Voltage Stability Margin. *Trakia Journal of Sciences*, 7(3), 81-90.
- [14] Kamarposhti, M. A., & Alinezhad, M. (2010). Comparison of SVC and STATCOM in static voltage stability margin enhancement. *system*, 9, 1.
- [15] Sode-Yome, A., & Mithulananthan, N. (2004). Comparison of shunt capacitor, SVC and STATCOM in static voltage stability margin enhancement. *International Journal of Electrical Engineering Education*, 41(2), 158-171.
- [16] Canizares, C. A. (2002). Voltage stability assessment: concepts, practices and tools. *IEEE/PES power system stability subcommittee special publication, (SP101PSS)*.
- [17] Sode-Yome, A., Mithulananthan, N., & Lee, K. Y. (2006). A maximum loading margin method for static voltage stability in power systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, 21(2), 799-808.
- [18] Sode-Yome, A., Mithulananthan, N., & Lee, K. Y. (2007, June). A comprehensive comparison of FACTS devices for enhancing static voltage stability. In *2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting* (pp. 1-8). IEEE.
- [19] Puneet Chawla, Balwinder Singh, "Voltage Stability Assessment and Enhancement Using STATCOM - A Case Study", *World Academy of Science, Engineering and Technology International*

*Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering* Vol:7, No:12, 2013

- [20] Kazemi, A. and Badrzadeh, B., "Modeling and Simulation of SVC and TCSC to Study Their Limits on Maximum Loadability Point", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 26, No. 8, 619-626, 2004
- [21] Nwohu, M. N. (2009). Voltage stability improvement using static VAR compensator in power systems. *Leonardo Journal of Sciences*, 14, 167-172.

Araştırma Makalesi/Research Article

## Serpantinın asfalt betonunda filler olarak kullanımı

Bektaş Sümen<sup>1</sup>, Nihat Morova<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 32200, Isparta, Türkiye

<sup>2</sup> Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 32200, Isparta, Türkiye

### Anahtar Kelimeler

Bitümlü sıcak karışım (BSK)  
Serpantin  
Aşınma tabakası  
Mineral filler  
Marshall stabilite-akma deneyi

### Makale geçmişi:

Geliş Tarihi: 27.07.2022

Kabul Tarihi: 28.11.2022

**Öz:** Ülkemizde bulunan doğal kaynakların verimli, etkin ve daha uzun süre kullanılabilmesi için alternatif malzemelerin araştırılıp bulunması her geçen gün daha önemli bir hal almaktadır. Her alanda olduğu gibi atık malzemelerin bitümlü sıcak karışımlarda (BSK) kullanımı gün geçtikçe artmaktadır. Bu çalışmada atık serpantin toz atıklarının BSK'da filler olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Çalışmada, serpantin'in asfalt beton kaplamalarda filler olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu amaçla kireçtaşı agrega ve kırmataş tozu filler kullanılarak %3.5-4.0-4.5-5.0-5.5-6.0 bitüm oranlarında Marshall briketleri hazırlanmıştır. Hazırlanan bu numunelere Marshall stabilite ve akma deney prosedürü uygulanarak stabilite, akma, pratik özgül ağırlık (Dp), boşluk yüzdesi (Vh) asfaltla dolu boşluk yüzdesi (Vfa), agregalar arası boşluk yüzdesi (VMA) değerleri bulunmuştur. Kireçtaşı numune sonuçlarından ilgili grafikler çizilerek optimum bitüm miktarı belirlenmiştir. Belirlenen optimum bitüm miktarı esas alınarak ve aynı gradasyon kullanılarak kireçtaşı filler ile serpantin filler malzemesi %0-25-50-75-100 oranlarında yer değiştirilerek serpantin ikameli asfalt beton numuneler üretilmiştir. Serpantin filler ikameli briketlerin stabilite, akma, Dp, Vh, Vfa, VMA değerleri tespit edilerek deney sonuçları değerlendirilmiştir. Çalışma sonucunda en yüksek stabilite değeri %50 serpantin ikameli numunelerden elde edilmiştir.

### Atıf için/To Cite:

Sümen B. Morova N. Serpantinın asfalt betonunda filler olarak kullanımı. Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi, 14(2), 75-86, 2022.

## Using serpentine as filler in asphalt concrete

### Keywords

Bituminous hot mixes  
Serpentine  
wearing course  
Mineral filler  
Marshall stability and flow tests

### Article history:

Received: 27.07.2022

Accepted: 28.11.2022

**Abstract:** In order to use the natural resources in our country efficiently, effectively and for a longer time, it is becoming more important to research and find alternative materials. As in every field, the use of waste materials in bituminous hot mixes is increasing day by day. In this study, the usability of waste serpentine dust wastes as fillers in HMA was investigated. In the study, the usability of serpentine as filler in asphalt concrete pavements was investigated. For this purpose, Marshall briquettes were prepared with bitumen ratios of 3.5-4.0-4.5-5.0-5.5-6.0% by using limestone aggregate and crushed stone dust filler. By applying Marshall stability and flow test procedure to these prepared samples, stability, flow value, bulk specific gravity (Dp), void volume values (Vh), Void filled with asphalt (Vfa), voids in mineral aggregate (VMA) values were found. Optimum amount of bitumen was determined by drawing related graphs from the limestone sample results. Based on the optimum amount of bitumen determined and using the same gradation, limestone filler and serpentine filler material were replaced at the rate of 0-25-50-75-100%, and serpentine-substituted asphalt concrete samples were produced. The stability, yield, Dp, Vh, Vfa, VMA values of the serpentine filler substituted briquettes were determined and the test results were evaluated. As a result of the study, the highest stability value was obtained from the samples with %50 serpentine content.

## 1. Giriş

Bitümlü sıcak karışım (BSK) agrega ve asfalt çimentosunun kombinasyonundan oluşmaktadır. Asfalt betonunda agrega yapısal iskelet görevi görürken bitüm bağlayıcılık görevini üstlenir. Esnek kaplamalarda kullanılan kaba, ince agrega ve mineral filler hacmin yaklaşık %90'ını oluşturmaktadır. Asfalt kaplamaların performansı üretiminde kullanılan agreganın özelliklerine bağlıdır [1].

Asfalt betonu, sahip olduğu özellikler nedeniyle üst yapılarda en çok kullanılan malzemelerdir. Stabilitate, dayanıklılık, sürüş konforu ve suya dayanıklılık sağlamada üstün hizmet performansına sahiptir [2].

Karayollarının inşaa maliyeti oldukça pahalı yapılardır. Esnek kaplamalı yollar 20 yıllığına projelendirilir ve bu süre zarfında konforlu, güvenli bir şekilde bozulmadan hizmet vermesi beklenmektedir. Bu sebeplerden dolayı kaplama yapımında kullanılacak malzemelerin standartlara uygun olmasının yanında yapısal olarak iyi tasarlanmaları gerekmektedir. Günümüzde kaplama performansını ve ömrünü arttırmak amacıyla farklı katkı malzemeleri kullanılmaktadır [3].

Esnek kaplamaların maruz kaldığı trafik hacmi ve dingil yükleri gün geçtikçe artmaktadır. Bunun yanında kaplama dizaynında yapılan hatalar, uygulama eksiklikleri, bakım ve onarımın zamanında ve gerektiği şekilde yapılmaması, iklim koşulları gibi nedenlerle kaplamalarda tekerlek izinde oluklanma, kırılma, yorulma ve neme karşı hassasiyet gibi bozulmalar meydana gelmekte buda üstyapının seyir konforunu azaltmanın yanında kaplamanın ömrünü azaltmaktadır. Bu durum, mevcut asfalt karışımların özelliklerini artırmanın gerekliliğini ortaya koymaktadır.

Asfalt beton kaplamaların imalatında agrega, filler ve asfalt çimentosu kullanılmaktadır. Asfalt karışımlardaki boşlukları doldurmak, stabiliteyi arttırmak amacıyla belirli miktarda filler kullanılması arzu edilmektedir [4].

Esnek kaplamalarda meydana gelen tekerlek izi ve bozulmalara karşı asfalt karışımların durabilite ve stabilitesini arttırmak amacıyla filler konusunda çalışmalar yapılmıştır. Esnek üstyapılarda fillerin üstlendiği önemli rolün farkına ilk olarak varan Clifford Richardson, filler ve toz terimlerini kullanarak fillerin önemini vurgulamıştır.

Belirli mineral filler malzemelerinin kullanımı, asfalt betonundaki tekerlek izi derinliği, rijitlik ve gerilme artışı üzerinde olumlu bir değer artışı sağlar. Ayrıca kalıcı deformasyon, yorulma çatlağı ve nem hasarına karşı olumlu bir etkiye sahiptir [4].

Mineral fillerin iki ana görevi vardır. İlki karışımda oluşan boşlukları doldurmaktır. Bu sayede daha yoğun ve daha sert tabakalar oluşturulur. İkincisi ise daneler arası temas noktası sağlamaktır. Genellikle BSK'da kırmataş tozu, mineral filler olarak kullanılmaktadır [5].

Serpantin yüksek oranda Mg, Fe ve olivin ( $Mg_2SiO_4$ ), piroksen ( $XYSi_2O_6$ ) gibi mafik mineraller içeren kayaç ve silikat mineralleri ultramafik kayaç adını almaktadır (gabro, bazalt, peridotit gibi). %45'ten azı silika olan kayaçlara ise ultramafik kayaçlar adı verilmektedir. Serpantin, peridotit ve piroksenitin hidratasyonu nedeniyle değişikliğe uğrayarak oluşmuş bir kayaç tipidir ve ultramafik kayaların aşınması ile oluşmaktadır. Bu magmatik veya metamorfik kayaların en az %70'i ferromagnezyen veya mafik (Magnezyum + ferrik = mafik) minerallerden oluşmaktadır [6].

Dünyanın birçok yerindeki serpantin kaynağı dünyanın mantosuna dayanmaktadır. Pürüzsüz ve zeytin-yeşili renkte, alacalı, pullu olması 7 nedeniyle latince yılan anlamına gelen "serpentinus" tan adını almıştır. Serpantin kayalar faylar ve makaslama zonlarında genellikle büyük masifler ve kemerler halinde yayılmaktadır [6].

Dünya yüzeyinin %1'nden daha az bölümünü kaplayan ultramorfik (serpantin) kayalar, dünya genelinde yamalar halinde yayılış gösterir. Serpantin oluşumunun edafik faktörleri fiziksel, kimyasal ve biyotik bileşenleri içerecek şekilde çok yönlüdür [6].

Ultramafik kayaçlar ülkemizin geneline yayılı halde bulunur. Genellikle doğu ile güneydoğu bölgelerindeki iller Antalya, Kütahya, Balıkesir, Adana, Hatay, Doğu Toroslar çevrelerinde rastlanmaktadır. Ankara ve Çanakkale civarlarında ise lokal olarak rastlanmaktadır [7].

BSK kaplamalarda filler kullanımının üstyapılardaki performans ve dayanıklılığı artırılmasına yönelik birçok çalışma yapılmıştır.

Mermer toz atıklarının esnek kaplamalarda filler olarak kullanımının incelendiği çalışmada gradasyon sabit tutularak kırma taş tozu ve atık mermer tozu filler malzemesi olarak kullanılmıştır. Mermer ve kireçtaşı fillerli Marshall briketleri hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelere Marshall stabilitesi prosedürü uygulanmıştır. Çalışma sonucunda mermer tozunun esnek üstyapılarda filler olarak kullanılabileceği belirlenmiştir [8].

Yanmış fındık kabuğu külü ve Eti Krom tesislerinde kromit cevheri zenginleştirmesi sırasında ortaya çıkan atık geri kazan külü malzemelerinin esnek üst yapı kaplamalarında filler materyali olarak

kullanılabilirliğinin araştırıldığı çalışmada öncelikle kalker filler ile sabit filler oranı kullanılmış (%4.7) ve ideal asfalt çimentosu yüzdesi Marshall stabilite deneyleri ile belirlenmiştir (%4.6). İkinci ve üçüncü aşamalarda ise kalker filler malzemesini farklı oranlarda fındık kabuğu külü ve atık geri kazan külü ile karıştırarak (%25-75, %50-50, %25-75, %100) oluşturulan deney numunelerine stabilite, pratik özgül ağırlık, asfalt dolu boşluk oranı, boşluk yüzdesi değişimi, akma değişimi ve agregalar arası boşluk değişimi deneyleri uygulanarak deney sonuçları yorumlanmıştır. Çalışmada atık geri kazan külünün fındık kabuğu külüne göre daha iyi bir alternatif olduğu belirtilmiştir [9].

Grafit'in asfalt üstyapılarda filler olarak kullanılmasının araştırıldığı çalışmada, grafit'in BSK'daki etkisi %5.5, 6, 6.5 ve 7 bitüm oranıyla hazırlanan numuneler Marshall stabilite deneyine tabii tutulmuş olup optimum bitüm %6.1 olduğu tespit edilmiştir. Optimum bitümlü grafit yüzdesi %6, 10 ve 15 olacak şekilde ayarlanan numuneler Marshall deneyine tabii tutularak çıkan sonuçlar incelendiğinde; Grafit ilaveli taş mastik asfalt karışımı grafit ilavesiz taş mastik asfalt karışımlarına göre grafit miktarı arttıkça hacim özgül ağırlık, asfalt dolu boşluk, stabilite ve akma değerlerinde azalma boşluk miktarı ve VMA'da artma olduğundan, BSK'da grafit malzemesini performansı olumsuz etkilediği tespit edilmiştir [10].

Carboniferous-Triassic (mor filler) kayaç tozlarının esnek üstyapılarda filler olarak kullanılabilirliğinin araştırıldığı çalışmada bağlayıcı oranı %3.5, 4.0, 4.5 ve 5.0 ve %4, 6 ve 8 filler oranında hazırlanmış numuneler Marshall stabilite deneyine tabii tutularak optimum bitüm ile optimum filler oranları belirlenmiştir. Ardından her bir bağlayıcı ve filler oranı için 4'er tane numune hazırlanmış. Filler olarak kırılmış Kireç ve Carboniferous-Triassic kayaç tozları kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlardan sonra carboniferous-triassic kayaç tozlarının kireç taşı yerine kullanılabileceği tavsiyesinde bulunulmuştur [11].

Bu çalışmada ülkemizin sahip olduğu kaynakların etkili ve doğru kullanımı ile atık malzemelerin asfalt beton üretiminde kullanılabilirliği amaçlanmıştır. Bu amaçla atık serpantin asfalt betonunda mineral filler malzemesi olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Ülkemizin çeşitli bölgelerinden çıkarılan bu kayacın mekanik ve fiziksel özellikleri dikkate alınarak karayollarında dayanımın artırılması ve doğal kaynakların tüketiminde daha tasarruflu olunabilmesi için filler malzemesi yerine kullanılabilirliği amaçlanmıştır.

Çalışmada ön deneyler yapılarak optimum filler miktarı olarak %4.8 olarak belirlenmiştir. Belirlenen optimum

filler oranında, kaba, ince ve filler malzemesi kireçtaşı olan numuneler hazırlanmıştır. Çalışmada %3.5- 4.0- 4.5- 5.0- 5.5-6.0 bitüm içeriklerinde hazırlanan Marshall numunelerine ait stabilite, akma, Dp, Vh, Vfa ve VMA grafikleri çizilerek bu grafiklerden optimum bitüm miktarı %4.85 olarak hesaplanmıştır. Belirlenen optimum bitüm içeriğinde (%4.85) kireçtaşı filler ile serpantin filler %0-25-50-75-100 oranlarında yer değiştirilerek her oranda 3 adet olmak üzere toplam 15 numune dökülerek serpantin ikameli briketlere ait stabilite, akma, Dp, Vh, Vfa ve VMA değerleri bulunmuştur. Deney sonuçları değerlendirilerek serpantin BSK'da filler malzemesi olarak kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

## 2. Materyal

Bu çalışmada, Isparta yöresindeki karayollarının yapımında kullanılan ve Göltaş Taş Ocağı'nda üretimi gerçekleştirilen kırmataş kireçtaşı (Kalker) agregası mineral filler olarak da kireçtaşı tozu (taş tozu, kırmataş tozu) ve serpantin toz atıklar kullanılmıştır. Kırmataş tozu, Kireçtaşı kökenli malzemenin konkasörlerde kırılmasıyla oluşan ve No:200 (0.075 mm açıklıklı) elekten geçen agrega tozudur. Çalışma kapsamında taştuzu olarak Isparta yöresinde faaliyet gösteren özel bir inşaat firmasından temin edilen ve Göltaş Taş Ocağı'nda üretilen kireçtaşı 200 numaralı elekten geçirilerek filler malzemesi olarak kullanılmıştır.

Çalışmada kullanılan iri ve ince agregalara ait fiziksel ve mekanik özellikler KTS'de belirtilen standartlara uygun olarak belirlenmiştir. Agregalara ait özgül ağırlık ve su emme deney sonuçları Tablo 1'de verilmiştir.

Serpantin toz atığı ise Eti Krom'dan temin edilmiş ve 200 nolu elekten elenerek çalışmada kullanılmıştır. Bitümlü sıcak karışım üretiminde kırmataş tozu ile yer değiştirilerek (ikame) kullanılmıştır. Şekil 1'de çalışmada kullanılan serpantin görülmektedir.



Şekil 1. Filler olarak kullanılan serpantin

Çalışmada kullanılan optimum filler oranı (%4.8) ön deney çalışmaları ile belirlenmiştir. Ön deneylerde maksimum stabiliteyi veren filler oranı optimum filler

oranı olarak seçilmiştir. Serpantinin kireçtaşı filler ile yer değiştirilerek (ikame) üretilen serpantin ikameli asfalt beton numunelerin hazırlanmasında filler oranı olarak %4.8 toplam filler oranı kullanılmıştır.

%0, %25, %50, %75, %100 serpantin ikameli (kalker filler ile yer değiştirilen) asfalt beton numuneler hazırlanmış ve Marshall testine tabi tutulmuştur. Çalışmada kullanılan serpantin özgül ağırlık değeri Tablo 1.'de verilmiştir.

Tablo 1. İri ve ince agregaya ait özgül ağırlık ve su emme deney sonuçları

Deney	Sonuç	Standart
İri agregaya zahiri özgül ağırlık (gr/cm <sup>3</sup> )	2.714	ASTM C 127 [12].
İri agregaya hacim özgül ağırlık (gr/cm <sup>3</sup> )	2.686	ASTM C 127
İri agregaya su absorpsiyonu	%0.4	ASTM C 127
İnce agregaya zahiri özgül ağırlık (gr/cm <sup>3</sup> )	2.716	ASTM C 128 [13].
İnce agregaya hacim özgül ağırlık (gr/cm <sup>3</sup> )	2.674	ASTM C 128
İnce agregaya su absorpsiyonu	%0.6	ASTM C 128
Filler Cinsi	Özgül Ağırlık Değeri (gr/cm <sup>3</sup> )	Standart
Kırmataş filler (Taş tozu)	2.729	ASTM C 854 [14].
Serpantin fillerleri	2.730	ASTM C 854

Çalışmada kullanılan iri ve ince agregalara ait fiziksel ve mekanik özellikler KTŞ'de belirtilen standartlara uygun olarak belirlenmiştir. Çalışmada kullanılan agregaya fiziksel ve mekanik özelliklerini gösteren deney sonuçları sırasıyla Tablo 2'de verilmiştir.

Bağlayıcı asfalt çimentosu olarak Aliğa rafinerisinde üretilmiş olan bitüm kullanılmıştır. BSK numunelerin üretiminde kullanılan bitüm Isparta Belediyesi Asfalt Şantiyesinden alınmıştır. Çalışmada kullanılan bitüm B 50-70 penetrasyon sınıfındadır.

Çalışmada, bağlayıcı asfalt çimentosu olarak kullanılan bitüm, Aliğa rafinerisinde üretilmiştir. BSK numunelerin üretiminde kullanılan bitüm Isparta Belediyesi asfalt şantiyesinden alınmıştır. Asfalt çimentosu B 50-70 penetrasyon sınıfındadır. Özgül ağırlığı 1.037 gr/cm<sup>3</sup> olan bitüm kullanılmıştır. Tablo 3'te asfalt çimentosunun özellikleri verilmiştir. Bitüm

üzerinde yapılan deney çalışmaları sonucundan kullanılan bitümün KTŞ standartlarına uygun olduğu belirlenmiştir.

Tablo 2. Agregaların fiziksel ve mekanik özellikleri

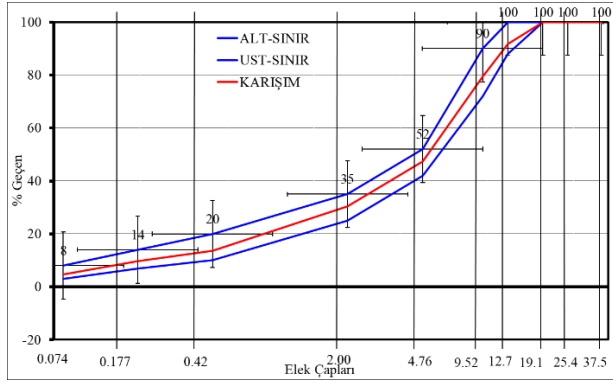
Agrega Deneyleri	Sonuç	Standart	
Karışımın Efektif Özgül Ağırlığı (Deneyle)	2.699	ASTM D-2041 [15].	
Karışımın Efektif Özgül Ağırlığı (Hesapla)	2.699	-	
Agrega Deneyleri	Sonuç	KTŞ Değerleri (Aşınma tabakası için)	Standart
Los Angeles Aşınma Kaybı, (%)	22	≤27	TS EN 1097-2 [16].
Aşınma Direnci (Mikro-Deval)	9.1		TS EN 1097-1 [17].
Hava Tesirlerine Karşı Dayanıklılık, (%)	2.4	16	TS EN 1097-1
Yassılık İndeksi, (%)	19.3	≤20	BS 812 [18].
Soyulma Mukavemeti, (%)	65	≥60	TS EN12697-11 [19].
Metilen mavisi, (g/kg)	0,55	≤1,5	TS EN 933-10 [20].

Tablo 3. 50/70 Penetrasyon sınıfındaki bitümün özellikleri

Deney Adı	Deney Sonucu	Şartname Değerleri (KTŞ 2013)	Standart
Penetrasyon Deneyi, (25°C)0,1mm	58	50-70	TS EN 1426 [21].
Yumuşama Noktası, (°C)	51	46-54	TS EN 1427 [22].
Parlama Noktası, (°C)	247	≥230	TS EN ISO 2592 [23].



Deneylerde kullanılan agrega gradasyonunu Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. Deneylerde kullanılan agrega gradasyonu grafiği

### 3. Metot

#### 3.1. Marshall stabilite ve Akma Deneyi

Marshall tasarımı Bruce Marshall tarafından 1939 yılında geliştirilip formülize edilmiştir. 1943'te Amerikan Ordusu Mühendisler Birliği gradasyon ve trafik koşulları fonksiyonlarına dayanarak optimum bitüm miktarı tayininde kullanılmak üzere Marshall metodunu kabul etmiştir. Marshall metodu istenilen yoğunluk, stabilite ve akma değerlerine sağlama kriteri ile optimum bitüm oranı tayininde kullanılmaktadır. Marshall tasarım metodunun Türk standartlarındaki karşılığı TS3720'de verilmiştir [24].

Bitümlü karışım tasarım yöntemlerinden en yaygın kullanılan yöntemdir. Marshall stabilitesi bir esnek kaplamanın yapısal durumu hakkında bilgi vermektedir. Üstyapının yapısal durumu denildiği zaman genellikle akla kaplamanın stabilitesi gelir. Stabilite, BSK'nın yapısal durumunu ifade eder. Bu yapısal durum karışım içeriğindeki asfalt çimentosunun özellikleri ve miktarı, kaplamanın imalatında kullanılan agreganın fiziksel ve mekanik özellikleri ile agrega gradasyonuna bağlıdır.

Marshall stabilite ve akma deneyinde, çelik kalıplar ve sıkıştırıcı kompaktörler (Şekil 3) yardımıyla 101 mm çapında ve 63.5 mm yüksekliğe sahip silindirik numuneler üretilir. Marshall deney cihazı (Şekil 4) ile 50 mm/dk'lık sabit bir hızda ve uygun sıcaklıkta (60 °C sıcaklık altında) numunelere yükleme yapılarak stabilite (deformasyona karşı dirençleri) ve akma değerleri belirlenmektedir [25].

Marshall stabilite ve akma deneyinde numunenin kırılmadan taşıyabileceği maksimum yük Marshall stabilitesi ve kırılma anına kadar oluşan deformasyon miktarı ise Marshall akması olarak isimlendirilir.



Şekil 3. Marshall sıkıştırma cihazı



Şekil 4. Marshall stabilite ve akma cihazı

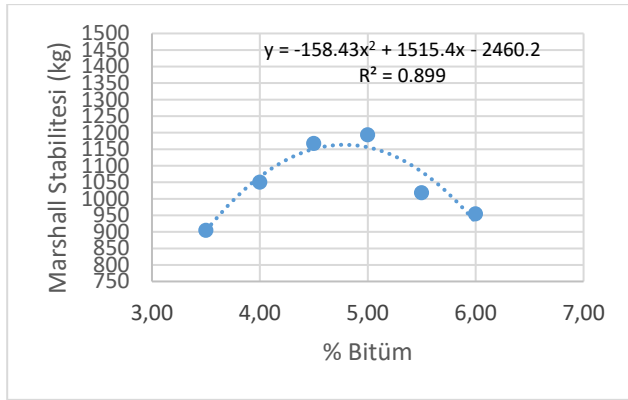
### 4. Bulgular ve Tartışma

#### 4.1. Kireç taşının filler olarak kullanıldığı numunelere ait Marshall stabilite ile akma deneyi sonuçları ve grafikleri

Kireçtaşı tozunun filler olarak kullanıldığı numunelere ait bitüm oranı-stabilite, bitüm oranı-akma, bitüm oranı- Dp, bitüm oranı-Vfa yüzdesi, bitüm oranı- Vh, bitüm oranı- VMA yüzdesi grafikleri sırasıyla Şekil 5, 6, 7, 8, 9 ve 10'da verilmiştir.

Marshall stabilitesi bir esnek kaplamanın yapısal durumu hakkında bilgi vermektedir. Üstyapının yapısal durumu denildiği zaman genellikle akla kaplamanın stabilitesi gelir. Stabilite, BSK'nın yapısal durumunu ifade eder. Bu yapısal durum karışım içeriğindeki asfalt çimentosunun özellikleri ve miktarı, kaplamanın imalatında kullanılan agreganın fiziksel ve mekanik özellikleri ile agrega gradasyonuna bağlıdır.

Şekil 5'deki stabilite grafiği incelendiğinde stabilite değeri bitüm miktarına bağlı olarak yükselmekte, bitüm oranı arttıkça stabilite yükselmekte ancak belirli bir noktadan sonra bitüm içeriği artmasına rağmen stabilite düşmektedir. Başka bir ifadeyle bitüm oranı arttıkça stabilite yükselmekte ve maksimum değerini aldıktan sonra bitüm oranı artmasına rağmen stabilite değeri düşmektedir. Bunun nedeni sıkıştırılmış numunede agregalar arası boşluğun asfalt ile dolmasıdır. Agregalar arasındaki bitüm miktarı arttıkça stabilite düşmektedir. Stabilite ve bitüm oranı grafiği incelendiğinde %5.00 bitüm oranında hazırlanan numunenin en yüksek stabilite değeri olan 1193 kg değerine ulaştığı görülmektedir.



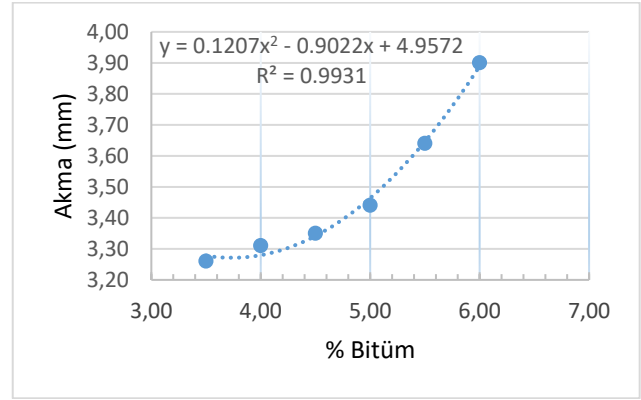
Şekil 5. Kırmataş tozu kullanılan biriketlerin Marshall stabilitesinin bitüm yüzdesi ile değişimi

Şekil 6 incelendiğinde bitüm oranı arttıkça akmanın da artış gösterdiği görülmektedir. KTŞ'ye göre asfalt beton kaplamalarda akma sınır değerleri 2-4 mm olarak verilmiştir. Grafik incelendiğinde tüm numunelerin akma değerlerinin şartnameye uygun olduğu görülmektedir.

Esnek kaplamalar ağır trafik yüklerine maruz kalmaktadır. BSK'da akma değeri BSK'nın plastiklik özellikleri hakkında bilgi vermektedir. KTŞ' de aşınma tabakası için akma değerlerinin 2-4mm olması istenmektedir. Burada aşınma tabakasında oluşmasına izin verilen maksimum akma değeri karışımda kullanılacak bitüm miktarını kontrol etmektedir. Şartnamede izin verilen sınır alt değer ise BSK'nın gevrekliğini ve mukavemetini kontrol etmektedir. Sıkıştırılmış Marshall numunelerinin deformasyona uğrayarak kırılmasına neden olan yüke tekabül eden akma değeri bitümlü karışımlarda iç sürtünmenin göstergesidir. Akma ve iç sürtünme değerleri arasında ters ve doğrusal bir korelasyon vardır. Marshall metodunda akma değeri numunenin deformasyonunu temsil etmektedir. Marshall cihazına yerleştirilen numunenin kırılma işlemi sonucunda okunan stabilite değerine denk gelen akma değeri içsel sürtünmenin bir

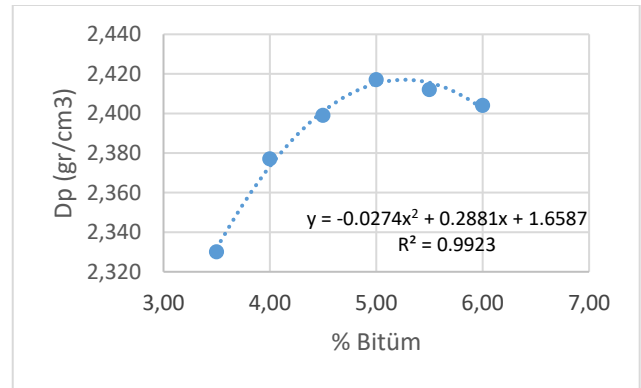
göstergesidir. İçsel sürtünme ve akma arasında ters bir ilişki söz konusudur [26].

Akma ve bitüm oranı grafiğinde bitüm miktarı ile akma arasında doğru orantı olduğu görülmektedir. Bitüm miktarının artmasıyla agregalar arasındaki asfalt film takası içsel sürtünmeyi etkilemekte ve akma değeri yükselirken stabilite düşmektedir.



Şekil 6. Kırmataş tozu kullanılan biriketlerin akma değerinin bitüm yüzdesi ile değişimi

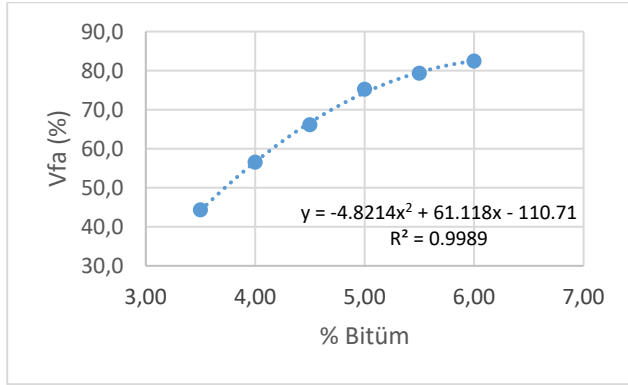
Şekil 7'de görüldüğü üzere Dp değeri belirli bir noktaya kadar bitüm oranının artmasıyla birlikte artış göstermiştir. Bitüm oranının %5.20 olduğu noktada Dp değeri maksimum değerine ulaşmış ve bu noktadan sonra düşmeye başlamıştır. Dp arttıkça daha az boşluklu bir numuneye ulaşma düzeyi artacağından, Vfa oranı artmakta, Vfa değerinin artmasıyla da agregalar arası boşluğun asfaltla daha fazla dolması da boşluk miktarının azalmasına neden olmaktadır.



Şekil 7. Kırmataş tozu kullanılan biriketlerin Dp değerinin bitüm yüzdesi ile değişimi

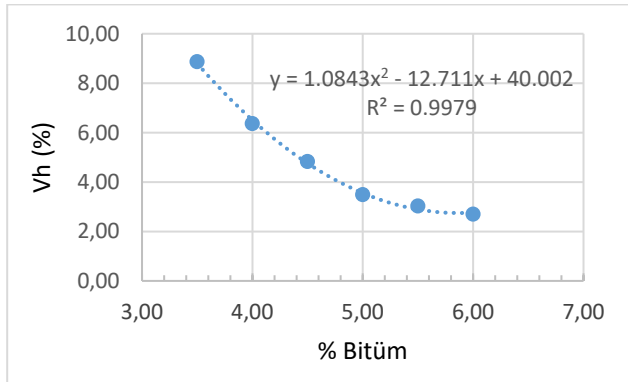
Çalışmada %3.5- 4.0- 4.5- 5.0- 5.5-6.0 bitüm içeriklerinde hazırlanan Marshall numunelerine ait Vfa grafiği incelendiğinde (Şekil 8) bitüm miktarı arttıkça VMA'nın bitümlü daha fazla dolduğu, vfa değerinin bitüm miktarı arttıkça arttığı gözlenmiştir. KTŞ'ye göre aşınma tabakası için sınır değerler 65-75 (%) olarak belirlenmiştir. Vfa yüzdesi, bitüm oranı %4.5

olduğunda alt sınır değerine (%65), bitüm oranı %5.0 olduğunda ise şartname üst sınırına (%75) ulaşmıştır.



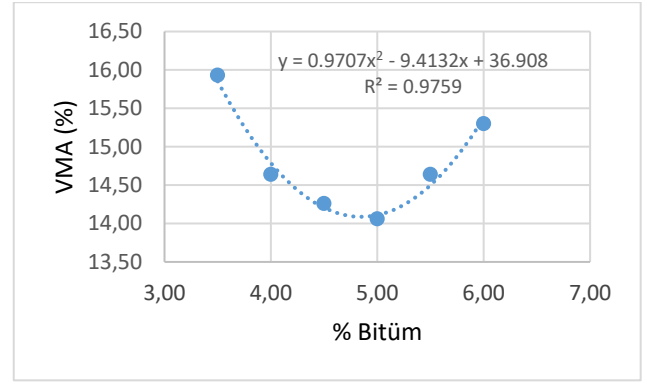
Şekil 8. Kırmataş tozu kullanılan biriketlerin Vfa değerinin bitüm yüzdesi ile değişimi

KTŞ'ye göre aşınma tabakası Marshall tasarım kriterlerinde izin verilen boşluk sınır değerleri %3-5'tir. Asfalt beton kaplamalarda optimum bitüm miktarının belirlenmesinde Vh olarak %4.0 değerine karşılık gelen bitüm oranıdır. BSK yollarda aşınma tabakası için istenen Vh değeri %4'tür. Bu orana tekabül eden bitüm oranı grafikte (Şekil 9) görüldüğü üzere %4.78'lik bitüm yüzdesidir.



Şekil 9. Kırmataş Vh değerinin bitüm yüzdesi ile değişimi

VMA yüzdesi sıkıştırılmış kaplama içindeki boşluk miktarının agregalara göre hacimce oranıdır. Vfa oranı ile VMA değeri arasında zıt bir ilişki bulunmaktadır. KTŞ'ye göre VMA değerinin %14'ten büyük olması istenmektedir. Özellikle sıcaklığın yüksek olduğu zamanlarda agregalar arasında yeterli boşluk olmaması durumunda asfalt beton kaplamalarda kusma meydana gelmektedir. VMA'yı sıkıştırılmış Marshall briketlerinin içindeki boşlukların ve bitümün toplu hacmi teşkil eder. Şekil 10'da VMA değerleri incelendiğinde maksimum değer %16, minimum VMA değerinin ise %14 üzerinde olduğu görülmektedir.



Şekil 10. Kırmataş tozu kullanılan briketlerin VMA değerinin bitüm yüzdesi ile değişimi

#### 4.2. Marshall stabilite ve akma deneyi ile optimum bitüm oranlarının belirlenmesi

Kırmataş filleri %0-25-50-75-100 oranlarında serpantin ile yer değiştirilerek belirtilen her bir serpantin ikame yüzdesinde üçer adet olmak üzere numuneler hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelere Marshall sıcak karışım tasarım yöntemi prosedürü uygulanarak bitüm oranı-stabilite, bitüm oranı-Dp, bitüm oranı- Vfa yüzdesi, bitüm oranı- Vh, bitüm oranı-VMA yüzdesi grafikleri hazırlanmıştır.

Kireçtaşı agrega gradasyonu sabit tutularak %3.5-4.0-4.5-5.0-5.5-6.0 bitüm oranlarında Marshall briketleri hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelere Marshall sıcak karışım tasarım yöntemi prosedürü uygulanarak bitüm oranı-stabilite, bitüm oranı-akma, bitüm oranı-Dp, bitüm oranı- Vfa yüzdesi, bitüm oranı- boşluk yüzdesi, bitüm oranı- VMA yüzdesi grafikleri hazırlanmıştır. Optimum bitüm miktarının tayininde maksimum stabiliteyi veren bitüm oranı (%4.70), maksimum pratik özgül ağırlığı veren bitüm oranı (5.20), Vfa yüzdesi %70 olarak belirlenen bitüm oranı (%4.70) ve %4 boşluk oranını veren bitüm oranı (%4.78) değerlerinin ortalaması alınarak belirlenmiştir (Tablo 4). Ayrıca asfalt betonu aşınma tabakası dizayn kriterleri Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 4. Optimum bitüm oranının belirlenmesi

	İstenilen	Oran
Pratik Özgül ağırlık (Dp), (gr/cm <sup>3</sup> )	Maksimum	5.20
Marshall Stabilitesi (MS), (kg)	Maksimum	4.70
Boşluk (Vh), (%)	4	4.78
Asfaltla dolu boşluk yüzdesi (Vfa), (%)	65-75 (70)	4.70
Optimum bitüm içeriği (Dp, MS, Vh ve Vfa'nın ortalaması)	4.85 (%)	

Tablo 5. Asfalt betonu dizayn kriterleri (27)

Özellikler	Binder		Aşınma TIP-1, TIP-2		Aşınma TIP-3	
	min.	maks.	min.	maks.	min.	maks.
Briket Yapımında Uygulanacak Darbe Sayısı	75		75		75	
Marshall Stabilitesi, kg	750	-	900	-	400	-
Boşluk, %	4	6	3	5	5	12
Asfaltta Dolu Boşluk, %	60	75	65	75	-	-
Agregalar Arası Boşluk, (VMA) %	13	15	14	16	-	-
Akma, mm (10 <sup>-2</sup> in)	2 (8)	4 (16)	2 (8)	4 (16)	2 (8)	4 (16)
Filler/Bitüm Oranı	-	1,4	-	1,5		
Bitüm (ağırlıkça, 100'e)	3,5	6,5	4,0	7,0	5,0	8,0
Sıkıştırılmış Bitümlü Karışımların Sudan Kaynaklanan Bozulmalara Karşı Direnci, İndirekt Çekme Mukavemeti (İÇM) Oranı, min. %	80		80		80	
Tekerlek Üzinde Oturma (30.000 devirde, 60 °C'de), maks. %	-		8		-	
Tekerlek Üzinde Oturma (3.000 devirde, 60 °C'de 5 cm kalınlığında numune), maks. %					7	

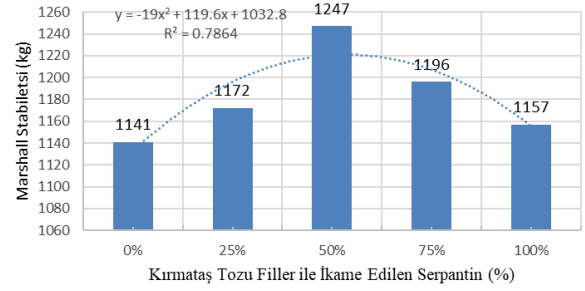
#### 4.3. Serpantin tozunun filler olarak kullanıldığı numunelere ait Marshall stabilite deney sonuçları

Çalışmada filler olarak kireçtaşının kullanıldığı, %3.5-4.0-4.5-5.0-5.5-6.0 oranlarında bitüm oranına sahip numuneler dökülerek optimum miktarı %4.85 olarak belirlenmiştir. Belirlenen %4.85 optimum bitim içeriğine göre kalker filler yerine serpantin ikameli numuneler hazırlanmıştır.

Kireçtaşı fillere kütlece toplam filler miktarının yüzdesi olarak %0, %25, %50, %75 ve %100 oranlarında serpantin ikame edilerek Marshall briketleri hazırlanmıştır. Serpantin ikameli asfalt beton numuneler Marshall stabilite ve akma testine tabi tutularak serpantin filler malzemesinin stabilite, akma, boşluk, Vfa miktarı ve VMA miktarı üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Serpantin ikame oranına bağlı olarak esnek üstyapının mühendislik özelliklerindeki değişimler %serpantin fillere göre stabilite değişim grafiği Şekil 11, %serpantin fillere göre akma değişim grafiği Şekil 12, % serpantin fillere göre D<sub>p</sub> değişim grafiği Şekil 13, % serpantin fillere göre % VMA değişim grafiği Şekil 14, % serpantin fillere göre V<sub>h</sub> değişim grafiği Şekil 15 ve % serpantin fillere göre asfalt dolu boşluk (Vfa) değişim grafiği Şekil 16'da verilmiştir.

Serpantin ikameli numunelere ait stabilite ve bitüm oranı grafiği (Şekil 11) ele alındığında sadece kireçtaşı filler ile hazırlanan (0% serpantin filler) brikete ait stabilite değerinin 1141 kg, %25 serpantin ikameli numunenin stabilite değerinin 1172 kg, %50 serpantin ikameli numunenin stabilite değerinin 1247 kg, %75 serpantin ikameli numunenin stabilite değerinin 1196 kg ve %100 serpantin ikameli numunenin stabilite değerinin 1157

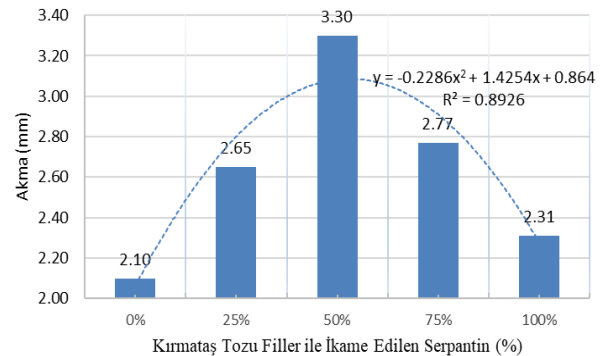
kg ve fillerin tamamının serpantin filler olduğu brikete ait stabilite değerinin ise 1157 kg olduğu görülmektedir. Stabilite, kireçtaşı filler ile üretilen şahit numuneye göre %25, %50, %75 ve %100, serpantin ikame oranlarında sırasıyla %2.7, %9.3, %4.8 ve %1.4 oranlarında artış göstermiştir. Serpantin ikameli briketlere ait stabilite değerlerinin şahit numuneye kıyasla daha iyi sonuçlar verdiği aynı zamanda KTŞ' de aşınma tabakası için belirlenmiş minimum stabilite değerinin üzerinde olduğu görülmektedir.



Şekil 11. % Serpantin fillere göre stabilite değişim grafiği

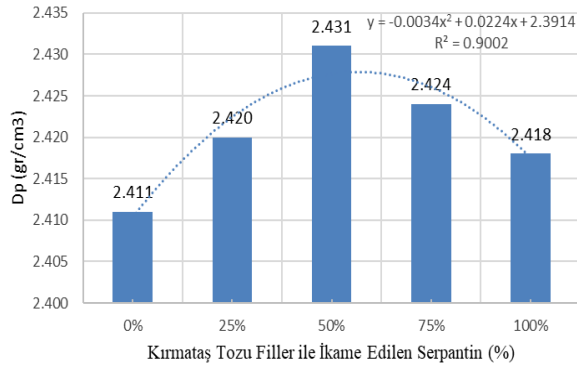
Hazırlanan numunelere ait Şekil 12'deki akma grafiği incelendiğinde akma değerlerinin 2,10 mm ile 3.30 mm arasında değiştiği görülmektedir. Serpantin ikamesi arttıkça akma değerlerinde belirli bir noktaya kadar artma, bir noktadan sonra ise azalma görülmektedir. Asfalt beton kaplamalarda akma değeri yükseldikçe kaplamanın daha fazla plastik davranış göstereceği ve deformasyona uğrama potansiyelinin artacağı bilinmektedir. Düşük akma değerleri ise esnek kaplamada bitüm oranının gerekenden az olduğunu, kaplamanın aşırı rijit ve gevrek olduğunu, kaplamada düşük sıcaklık yorulma çatlaklarının oluşabileceği anlamına gelmektedir.

Çalışmada tüm serpantin ikameli numuneler şartname sınır değerleri içerisinde kalmaktadır. Belirli bir noktadan sonra (%50 serpantin) numunelerdeki akma değerindeki düşüşün nedeninin serpantin yapısı özellikleri sebebiyle karışımda kullanılan bitümün bir kısmını absorbe etmesi, asfalt numunesinin homojen yapısını bozması olarak düşünülmektedir.



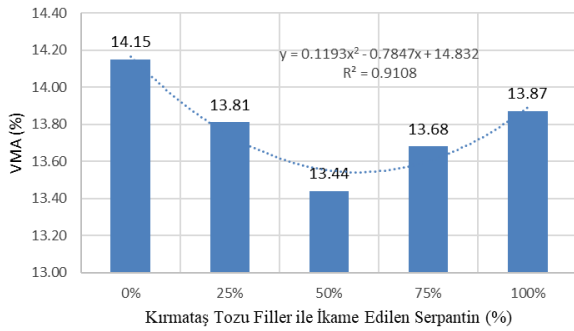
Şekil 12. % serpantin fillere göre akma değişim grafiği

Hazırlanan numune gruplarına ait pratik yoğunluk (Dp) değerleri Şekil 13'te gösterilmiştir. Deneysel sonuçları incelendiğinde Dp değerlerinin belli bir noktaya kadar artma eğilimi gösterdiği bu noktadan sonra ise azalmaya başladığı görülmektedir. Artan serpantin içeriği ile numunenin sıkışma değerinde azalma meydana geldiği ve boşluk hacmindeki artışın birim hacim ağırlıklarının azalmasına sebep olmuş olduğu düşünülmektedir. Dp değeri serpantin filler miktarının artmasıyla %25 ve %50 serpantin oranlarında şahit numuneye göre artış göstermiştir. %75 ve %100 serpantin ikameli numunelerde Dp çok küçük değerler olsa da şahit numuneye göre artış göstermiştir. En yüksek Dp değerine %50 serpantin ikameli numunede ulaşılmıştır.



Şekil 13. % serpantin fillere göre Dp grafiği

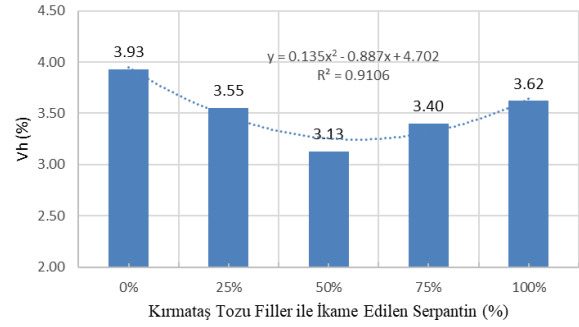
VMA grafiği incelendiğinde %25-50-75-100 serpantin ikameli briketlerde VMA değerinin şahit numuneye göre düştüğü görülmektedir. KTS'ye göre VMA değerinin %14'ten büyük olması istenmektedir. Özellikle sıcaklığın yüksek olduğu zamanlarda agregalar arasında yeterli boşluk olmaması durumunda asfalt beton kaplamalarda kuma meydana gelmektedir. Grafiğe bakıldığında serpantin ikameli numunelerin şartname sınırlarına yakın olmakla beraber %14 değerinin altında kaldığı görülmektedir.



Şekil 14. % Serpantin fillere göre % VMA değişim grafiği

Grafik incelendiğinde (Şekil 15) bitüm oranı arttıkça boşluklar asfalt çimentosuyla dolmakta ve Vh azalmaktadır. Esnek yol kaplamalarında boşluğun fazla olması çatlamalara ve akmaya neden olabilmektedir.

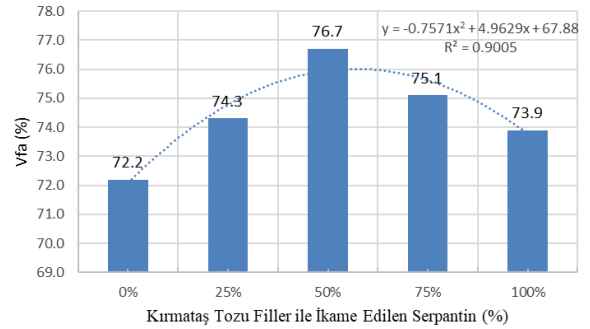
KTS'ye göre aşınma tabakası Marshall tasarım kriterlerinde izin verilen boşluk sınır değerleri %3-5'tir. Vh ve bitüm ilişkisini gösteren grafiğe bakıldığında %25, %50, %75 ve %100 serpantin ikameli briketlerde boşluk oranları sırasıyla %3.93-3.55-3.13-3.40-3.62 değerlerini almıştır. Değerler incelendiğinde serpantin ikameli tüm briketlerin şartname değerlerini sağladığı görülmektedir.



Şekil 15. % Serpantin fillere göre Vh değişim grafiği

Bu çalışmada kırmataş tozu fillerini yerine %0, %25, %50, %75 ve %100 serpantin ikamesi yapılmış ve asfalt dolu boşluk oranlarının sırasıyla %72.2, %74.3, %76.7, %75.1, %73.9 değerlerini aldığı gözlenmiştir.

Vfa asfaltla dolu boşluğu ifade etmektedir. BSK kaplamalarda boşlukların asfalt ile dolu olması homojenliği arttırmakta ve dayanımı olumlu yönde etkilemektedir. Şekil 16 incelendiğinde %50 serpantin ikameli numunede maksimum (%76.7) Vfa değerlerine ulaşıldığı, en düşük (%72.2) Vfa değerine ise şahit numunelerde (%0 serpantin filler) ulaşıldığı görülmektedir.



Şekil 16. % Serpantin fillere göre Vfa yüzdesi değişim grafiği



## 5. Sonuçlar

Çalışmada, serpantin toz atıkların BSK'da kireçtaşı filler yerine kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu amaçla gerçekleştirilen agrega, bitüm ve karışım deneylerinin sonucu elde edilen bulgulara göre ulaşılan sonuçlar aşağıdaki şekilde özetlenmiştir;

- Beton asfalt numunelerin üretiminde kullanılan agrega, filler ve bitüm için yapılan deneysel çalışmalar sonucunda agrega, filler ve bitümün şartname değerlerine uygun olduğu belirlenmiştir.
- Tez çalışmasında ön deneyler yapılarak optimum filler miktarı olarak %4.8 olarak belirlenmiştir. Belirlenen optimum filler oranında, kaba, ince ve filler malzemesi kireçtaşı olan numuneler hazırlanmıştır. Çalışmada %3.5- 4.0- 4.5- 5.0- 5.5-6.0 bitüm içeriklerinde hazırlanan Marshall numunelerine ait stabilite, akma, Dp, Vh, Vfa ve VMA grafikleri çizilerek bu grafiklerden optimum bitüm miktarı %4.85 olarak hesaplanmıştır.
- Belirlenen optimum bitüm içeriğinde (%4.85) kireçtaşı filler ile serpantin filler %0-25-50-75-100 oranlarında yer değiştirilerek her oranda 3 adet olmak üzere toplam 15 numune dökülerek serpantin ikameli briketlere ait stabilite, akma, Dp, Vh, Vfa ve VMA değerleri bulunmuştur.
- Stabilite, serpantin ikameli numunelerde artış göstermiştir. Sadece kireçtaşı filler ile hazırlanan şahit numuneye (0% serpantin filler) ait stabilite değerinin 1141 kg, %25 serpantin ikameli numunenin stabilite değerinin 1172 kg, %50 serpantin ikameli numunenin stabilite değerinin 1247 kg, %75 serpantin ikameli numunenin stabilite değerinin 1196 kg ve fillerin tamamının serpantin filler olduğu brikete ait stabilite değerinin ise 1157 kg olduğu görülmektedir. Stabilite, kireçtaşı filler ile üretilen şahit numuneye göre %0, %25, %50, %75 ve %100 serpantin ikame oranlarında sırasıyla %2.7, %9.3, %4.8 ve %1.4 oranlarında artış göstermiştir. Bu sonuçlar serpantin filler ikameli asfalt betonlarda Marshall stabilitesinin arttığı göstermiştir.
- KTŞ göre aşınma tabakası için sağlanması gereken 900 kg stabilite değerinin şahit numune ve %25-50-75-100 oranlarında

serpantin ikameli asfalt beton numunelerde sağlandığı görülmüştür.

- En yüksek stabilite değeri %50 serpantin ikameli numunede elde edilmiştir.
- KTŞ'ye göre aşınma tabakasında akma değerleri için sınır aralık 2-4 mm olarak ifade edilmektedir. Çalışmada, akma değerlerinin 2.10 mm ile 3.30 mm arasında olduğu tespit edilmiştir. Serpantin ikamesi arttıkça akma değerlerinde belirli bir noktaya kadar artış, bir noktadan sonra ise azalma olduğu görülmüştür. Çalışmada tüm serpantin ikameli numuneler şartname sınır değerleri içerisinde kalmaktadır. Belirli bir noktadan sonra (%50 serpantin) numunelerdeki akma değerindeki düşüşün nedeninin serpantin yapısal özellikleri sebebiyle karışımında kullanılan bitümün bir kısmını absorbe etmesi, asfalt numunesinin homojen yapısını bozması olarak düşünülmektedir.
- Çalışmada şahit numune ve %25-50-75-100 oranlarında serpantin ikameli BSK numunelerde akma değerlerinin KTŞ'nin standartlarına (2-4mm) uygun olduğu görülmüştür.
- Dp değeri serpantin filler miktarının artmasıyla %25 ve %50 serpantin oranlarında şahit numuneye göre artış göstermiştir. %75 ve %100 serpantin ikameli numunelerde Dp çok küçük değerler olsa da şahit numuneye göre artış göstermiştir. En yüksek Dp değerine stabilitenin en yüksek değeri aldığı %50 serpantin ikameli numune ulaşılmıştır.
- VMA ve bitüm oranı grafiği incelendiğinde %25-50-75-100 serpantin ikameli briketlerde VMA değerinin şahit numuneye göre düştüğü görülmektedir. Grafiğe bakıldığında serpantin ikameli numunelerin şartname sınırlarına yakın olmakla beraber %14 değerinin altında kaldığı görülmektedir. KTŞ'ye göre VMA değerinin %14'ten büyük olması istenmektedir. Özellikle sıcaklığın etkisiyle serpantin ikameli asfalt beton numunelerde agregalar arasında yeterli boşluk olmaması nedeniyle asfalt beton kaplamada kuma meydana gelebileceği belirlenmiştir.
- KTŞ'ye göre aşınma tabakası Marshall tasarım kriterlerinde izin verilen boşluk sınır değerleri %3-5'tir. Vh ve bitüm ilişkisini gösteren grafiğe bakıldığında %25, %50, %75

ve %100 serpantin ikameli briketlerde boşluk oranları sırasıyla %3.93-3.55-3.13-3.40-3.62 değerlerini almıştır. Değerler incelendiğinde serpantin ikameli tüm briketlerin şartname değerlerini sağladığı görülmektedir.

- Daha geniş ve kapsamlı çalışmalar sonucunda serpantin farklı disiplinlerde (çevre ve sağlık vb.) incelenmesi yine ulaştırma mühendisliği bakımından üstyapı mühendislerince daha detaylı (nem hasarı, optimum filler miktarı vb.) incelenmesi sonucunda serpantin asfalt beton kaplamalarda filler olarak kullanılması önerilmektedir.

## Kaynaklar

- [1] Ahmedzade, Perviz, and Burak Sengoz. "Evaluation of steel slag coarse aggregate in hot mix asphalt concrete." *Journal of hazardous materials* 165.1-3: 300-305, 2009.
- [2] Yılmaz M, Kök BV, & Kuloğlu N. Effects of using asphaltite as filler on mechanical properties of hot mix asphalt. *Construction and Building Materials*, 25(11), 4279-4286, 2011.
- [3] Serin S, Morova N, Saltan M, & Terzi S. Investigation of usability of steel fibers in asphalt concrete mixtures. *Construction and Building Materials*, 36, 238-244. 2012.
- [4] Ahmedzade P & Yılmaz M. Effect of polyester resin additive on the properties of asphalt binders and mixtures. *Construction and building materials*, 22(4), 481-486, 2008.
- [5] Saltan M, Öksüz B, Uz VE. Use of glass waste as mineral filler in hot mix asphalt. *Science and Engineering of Composite Materials*, 22(3), 271-277. 10.1515/secm-2013-0135, 2015.
- [6] Özbey BG. Ankara Elmadağ Serisinde Serpantinikol Endemizmin Ekolojik Uyum Mekanizmalarının Araştırılması. (Doktora Tezi Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara 2019.
- [7] Kurt L, Ozbey BG, Kurt F, Ozdeniz E & Bölükbaşı A. Serpentine Flora of Turkey. *Biological Diversity and Conservation*. 6/1 (2013) 134-152. 1308-8084
- [8] Terzi S. Mermer Toz Atıkların Asfalt Betonunda Filler malzemesi olarak kullanılmasının araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 2000.
- [9] Gündoğan H. Fındık Kabuğu Külü ve Yüksek Karbonlu Ferrookrom Üretim Fırınlarında Ortaya Çıkan Baca Külünün Asfalt Betonunda Filler Olarak Kullanımı. Yüksek Lisans Tezi, Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, Türkiye, 2021.
- [10] Kurt L, Ozbey, B.G., Kurt, F., Ozdeniz, E. & Bölükbaşı, A. Serpentine Flora of Turkey. *Biological Diversity and Conservation*. 6/1 2013 134-152. 1308-8084
- [11] Ceylan S. Bitümlü Sıcak Karışımlarda Filler Olarak Carboniferous-Triassic Kayaç Tozlarının Kullanılması ve Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, Türkiye, 2006.
- [12] ASTM C127-15. Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015. www.astm.org
- [13] ASTM C 128. Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2001 www.astm.org
- [14] ASTM C854, Standard Test Method for Resistance to External Loads on Metal Reflective Pipe Insulation 1990
- [15] ASTM D 2041. Standard Test Method for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Bituminous Paving Mixtures, Annual Book of ASTM Standards USA, 2004.
- [16] TS EN 1097-2. Agregaların Mekanik ve Fiziksel Özellikleri İçin Deneyler – Bölüm 2: Parçalanma Direnci Tayini İçin Yöntemler, Ankara, 2010.
- [17] TS EN 1097-1. Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler, bölüm 1: aşınmaya karşı direncin tayini (Mikro-Deval), Ankara, 2002.
- [18] BS 812: Part 2: (1975) Methods for determination of physical properties, British Standard Institution 1975.
- [19] TS EN 12697-11. Bitümlü karışımlar-Deney metotları-Sıcak karışimli asfalt içi-Bölüm 11: Agregave bitüm arasındaki bağlanmanı tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, s. 28, 2012.
- [20] TS EN 933-10. Tests for geometrical properties of aggregates-Part 10: Assessment of fines; Grading of fillers (air jet sieving). Türk Standartları Enstitüsü, Ankara 2015.
- [21] TS EN 1426. Bitüm ve Bitümlü Bağlayıcılar – İğne Batma Derinliği Tayini, Ankara. 2015.
- [22] TS EN 1427. Bitüm ve Bitümlü Bağlayıcılar – Yumuşama Noktası Tayini – Halka ve Bilye Yöntemi, Ankara, 2015.
- [23] TS EN ISO 2592. Petrol ve İlgili Ürünler – Parlama Yanma Noktasının Tayini, Cleveland Açık Kap Yöntemi, Ankara, 2017.
- [24] Yıldız K. *Marshall Dizayn Metodu ile Optimum Bitüm Muhtevasının Belirlenmesinde Deney Parametrelerinin Sonuca Etkisi*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2003.
- [25] İsfalt. Shell Bitüm El Kitabı, İstanbul Büyükşehir Belediyesi, İSFALT Bilimsel Yayın No:3, ISBN: 975-8183-02-8, İstanbul, 2004
- [26] Öksüz B. Asfalt Beton Kaplamalarda Volkanik Cüruf ve Cam Atıklarının Filler Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması. Yüksek Lisans



Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri  
Enstitüsü Isparta, Türkiye, 2011.

[27] Karayolu Teknik Şartnamesi. Ankara,  
Karayolları Genel Müdürlüğü, 2013

Araştırma Makalesi/Research Article

## Tuzlama uygulamalarının donma-çözülme döngülerine maruz kalmış asfalt betonu üzerindeki korozif etkisi

Hande Varol Morova \*1

<sup>1</sup>Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 32200, Isparta, Türkiye

### Anahtar Kelimeler

Buzlanmanın önlenmesi  
Buzlanmanın giderilmesi  
Sodyum klorür (NaCl)  
Tuzlama uygulamaları  
Üstyapı  
Sıcak karışım asfalt

### Makale geçmişi:

Geliş Tarihi: 28.07.2022

Kabul Tarihi: 12.11.2022

**Öz:** Bu çalışmada kış iklim şartlarında kar ve buzla mücadelede aktif olarak kullanılan farklı tuz içeriklerindeki solüsyonların farklı periyotlarda asfalt beton yollarda meydana getirmiş olduğu tahribat deneysel olarak araştırılmıştır. Kar ve buzun direkt olarak etkidiği aşınma tabakası için standartlar çerçevesinde hazırlanan sıcak karışım asfalt betonlar (BSK) farklı periyotlarda (7, 14, 21, 28 döngü) donma çözölmeye tabi tutulmuş ve her çözölmeye için iki farklı çözölmeye ortamı hazırlanmıştır. Bu nedenle 1 mol (M) ve 4 mol (M) olmak üzere iki farklı sodyum klorür (NaCl) çözeltisi hazırlanmış ve dondurulan BSK numuneler her döngü sonunda 1M ya da 4M'lık çözelti ortamlarında çözdürölmüştür. Böylece tuzun BSK yüzeyine olan zararına etkileri araştırılmıştır. Donma ve çözölmeye maruz kalmayan referans numunenin Marshall Stabilite (MS) değeri 985 kg iken 1M solüsyonda 7, 14, 21 ve 28 gün süreyle donma ve çözölmeye döngülerine maruz kalan numunelerin MS değeri sırasıyla 971 kg, 938.5 kg, 889.5 kg ve 910 kg olarak bulunmuştur. Diğer yandan 4M solüsyonda 7, 14, 21 ve 28 gün süreyle donma ve çözölmeye döngüsüne maruz kalan numunelerin MS değeri ise sırasıyla 914 kg, 814 kg, 790 kg ve 765 kg olarak elde edilmiştir. Bu çalışmayla donma-çözölmeye döngüsünün asfalt betonun stabilitesinde azalmaya neden olduğu görölmüştür.

### Atıf için/To Cite:

Morova H. V. Tuzlama uygulamalarının donma-çözölmeye döngülerine maruz kalmış asfalt betonu üzerindeki korozif etkisi. Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi, 14(2), 87-93, 2022.

## The corrosive effect of brine applications on the asphalt concrete exposed to the freeze-thaw cycles

### Keywords

Anti-icing  
Deicing  
Sodium chloride (NaCl)  
Salting applications  
Pavement  
Hot mix asphalt

### Article history:

Received: 28.07.2022

Accepted: 12.11.2022

**Abstract:** In this study, the damage caused by solutions with different salt contents, which are actively used in combating snow and ice in winter climate conditions, on asphalt concrete roads in different periods was investigated experimentally. Hot mix asphalt concrete (HMA) prepared within the framework of the standards for the wear layer directly affected by snow and ice were subjected to freeze-thaw at different periods (7, 14, 21, 28 cycles) and two different thawing environments were prepared for each thaw. For this reason, two different sodium chloride (NaCl) solutions, 1 mol (M) and 4 mol (M), were prepared and the frozen HMA samples were thawed in 1M or 4M solution environments at the end of each cycle. Thus, the effects of salt on the damage to the HMA surface were investigated. While the Marshall Stability (MS) value of the reference sample that was not exposed to freezing and thawing was 985 kg, the MS values of the samples exposed to freezing and thawing cycles for 7, 14, 21 and 28 days in 1M solutions were found to be 971 kg, 938.5 kg, 889.5 kg and 910 kg, respectively. On the other hand, the MS values of the samples exposed to freezing and thawing cycles for 7, 14, 21 and 28 days in 4M solution were obtained as 914 kg, 814 kg, 790 kg and 765 kg, respectively. In this study, it was observed that the freeze-thaw cycle caused a decrease in the stability of asphalt concrete.

## 1. Giriş

Karayolu ulaşımı eşya ve insan taşımacılığı için son derece önemlidir. Üstyapının hizmet ömrünü artırmak için soğuk havalarda gerekli bakımların yapılması, buz ve kardan korunması gerekir. Aynı zamanda yayalar ve sürücüler için kar ve buz koşullarının oluşturabileceği tehlikeleri önlemek için de yürüyüş yolları, merdivenler, asfalt yüzeyler vb. tüm yollar kar ve buzdan temizlenmelidir.

Kış mevsiminde üstyapıda oluşacak buzlanma sorununa karşı buzlanma önleyici, aşındırıcı gibi çeşitli yöntemler mevcuttur. Buz çözme uygulamalarının amacı, buz ve kaplama arasındaki bağı koparmak ve böylece buzun kazınmasını kolaylaştırmaktır [1]. Buzlanmanın önlemesi, üstyapıya kimyasal donma noktası düşürücünün zamanında uygulanmasıyla kar ve buz oluşumunu veya gelişimini önlemeye yönelik geliştirilmiş bir yöntemdir [2]. Aşındırıcılar, yol kaplama yüzeylerinde sürtünmeyi iyileştirmek için kullanılmakta olup sürtünme katsayısını artırarak araçlar için daha iyi çekiş ve kontrol sağlar [3].

Alternatif buzlanma önleyici ve buz çözücü kimyasallarının geliştirilmesi ve test edilmesine yönelik birçok çalışma yapılmış ve yapılmaya devam etmektedir. Kar yağışı sırasında veya sonrasında karayolundaki kar ve buz kontrol etmek için buz çözme teknikleri kullanılırken, kar yağışından önce buzlanma önleyici kimyasalların uygulanması dünya çapında daha çok rağbet görmektedir.

Olumsuz hava koşullarına karşı üç ana strateji geliştirilmiştir. Bunlardan ilki, mekanik temizleme, ikincisi buz çözme ve diğeri de buzlanmayı önlemedir. Bu stratejiler ayrı ayrı uygulanabilmekle birlikte, bir arada da kullanılmaktadır [2].

Son zamanlarda kar ve buz kontrolüne yönelik yaklaşımlar, reaktif yöntemlerden daha çok proaktif bir stratejiye kaymıştır. Kar yağışından önce kaplama ile kar arasındaki bağı önlemeye veya zayıflatmaya yönelik yöntemler sık tercih edilirken bir yandan da kimyasal aşındırıcılar kullanılarak yapılan klasik yöntem temel dayanak noktası olmaya devam etmektedir. Kimyasal uygulamalar genellikle klorürleri içermektedir. Ancak çevresel etkiler, araçlarda ve altyapıda oluşabilecek korozyon gibi çeşitli sebeplerden araştırmacılar asetatlar gibi alternatiflere yönelmişlerdir [4].

Kış bakım faaliyetleri için kullanılan en yaygın kimyasal ürünler sodyum klorür (NaCl), magnezyum klorür, kalsiyum klorür, kalsiyum magnezyum asetat ve potasyum asetattır [5]. Magnezyum klorürün yüksek maliyetinden dolayı sodyum klorür daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Çevreye zararlı etkileri ve sebep

olduğu korozyon kabul edilmiştir, ancak yolcu güvenliğinin faydaları klorürleri kullanımda tutmuştur. Yapılan çalışmalarda daha etkili, çevre dostu ve daha ekonomik kimyasallar araştırılmaktadır.

Sodyum klorürü satın almak ucuz olsa da korozyon ve çevresel etkiler gerçek maliyetini çok daha yüksek hale getirmektedir. Bir çalışmada, sodyum klorürün sebep olduğu zararlı etkilerin maliyetinin yaklaşık yılda 5 milyar dolar olduğu tahmin edilmektedir [2]. Bir başka çalışmada, klorür kullanımı nedeniyle köprü döşemelerinin zamanından önce bozulduğu, klorürlerden zarar gören beton köprülerin iyileştirilmesinin yılda 5 milyar dolara mal olabileceği ortaya çıkmıştır [6]. NaCl'nin korozyon ve çevresel etkilerinin, başlangıçtaki malzeme maliyetinden on kat daha pahalıya mal olabileceği bulunmuştur [7]. Tuzlamanın sosyal maliyetlerinin ekonomik bir değerlendirilmesi yapıldığında, NaCl'nin maliyetinin yolların ve köprülerin onarım ve bakım maliyetleri, araç korozyon maliyetleri ve yol kenarındaki ağaçların zarar görmesi yoluyla estetik değerlerin kaybı dahil ton başına 800 dolar olduğu tahmin edilmektedir [8].

Fischel (2001) tarafından yapılan bir analize göre, alternatif kimyasalların kullanımı arttıkça NaCl kullanımı her yıl azalmaktadır. Çalışmalarda asetatlar gibi daha az zararlı kimyasal alternatifleri denemekte olup kalsiyum magnezyum asetat ve potasyum asetat en sık kullanılan türlerdir. Asetatlar üstyapıda minimum düzeyde aşındırıcı olmalarına, nispeten çevresel açıdan zararsız olmalarına ve iyi performans göstermelerine rağmen, yüksek maliyetleri daha yaygın kullanımı yavaşlatmıştır [6], [9], [10].

Tarım endüstrisindeki yan ürünler de (örneğin klorür bazlı) kış bakım kimyasallarına katkı maddesi olarak kullanılmaktadır. Bilinen bazı yan ürünler, kamış veya pancar şekeri şurubu, mısır arpası veya diğer karbonhidratlar ve sütün fermantasyonu ile işlenmesi sonucu üretilir [5], [6], [11]. Son yıllarda yapılan araştırmalar, buz çözümünde kullanılan kimyasallara çeşitli organik bileşiklerin eklenmesinin donma noktasını önemli ölçüde azaltabileceğini göstermiştir [12]. Nixon, tarımsal bazlı katkı maddelerinin kış bakım malzemeleriyle birleştirilerek korozyon önleyici olarak işlev görebileceğini ve erime kapasitesini artırabileceğini belirtmiştir [13]. Ayrıca tarımsal bazlı katkı maddeleri yenilenebilir kaynakları kullandıklarından dolayı atık oluşumu daha azdır.

Çalışmada, tuz çözeltilerinin farklı süreler için BSK numunelerine verdiği zararlar deneysel olarak incelenmiştir. Hazırlanan BSK numuneleri farklı döngülerde (7, 14, 21 ve 28) dondurma ve çözme işlemine tabi tutulmuş ve her çözülme koşulu için iki farklı çözülme özelliği hazırlanmıştır. Bu nedenle 1 mol

(M) ve 4 Mol (M) olarak adlandırılan iki farklı NaCl solüsyonu hazırlanmış ve her döngü sonunda BSK numuneleri 1M ve 4M'de bekletilmiştir. Bu şekilde tuzun BSK'ya verdiği zarar deneysel olarak araştırılmıştır.

## 2. Materyal

Asfalt betonunda kullanılan agregaların en önemli özelliklerinden biri aşınmaya karşı olan direncidir. Üstyapıların farklı katmanlarında donma ve çözülme döngülerinin etkileri farklı seviyelerde görülmektedir. Agregaların fiziksel ve mekanik özellikleri donma ve çözülme döngülerinden olumsuz etkilenebilir. Üstyapılarda kullanılan agregalar için oluşabilecek bu olumsuz etkiler en aza indirilmelidir. Bu çalışmada belirli bir gradasyona sahip kırmataş agrega, filler ile asfalt çimentosu karıştırılarak BSK numuneleri laboratuvar ortamında hazırlanmıştır.

Asfalt betonu üretilmeden önce, karışımda kullanılacak agrega ve bitüm üzerinde, fiziksel ve mekanik karakterizasyonlarını belirlemek için bir dizi laboratuvar testi yapılmıştır. Bu testler sonucunda bitüm ve agreganın fiziksel ve mekanik özellikleri Tablo 1 ve Tablo 2'de gösterildiği gibi belirlenmiştir.

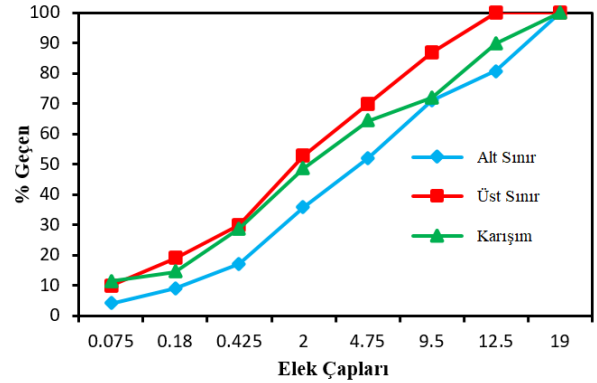
Çalışmada, elek analizi deneyi yapılarak agrega malzemesinin granülometre eğrisi belirlenmiştir (Şekil 1). Çalışmada kullanılan gradasyona Karayolları Teknik Şartnamesi (KTŞ) limitleri içerisinde kalmıştır [14].

Tablo 1. Sıcak karışım asfaltta kullanılan agregaların fiziksel ve mekanik özellikleri

Deney	Elek Çapları			Standart
	0.075-4.75 mm	4.75-9.5 mm	9.5-25 mm	
Su	* (3.54)	1.63	0.81	[15]
Absorpsiyonu %	*	*	23.80	[16]
Los Angeles %	*	*	23.80	[16]
İnce Malzeme %	* 14.51	1.27	0.45	[17]
Organik Malzeme	Temiz	Temiz	Temiz	[18]
Donma-Çözülme%	*	*	6.69	[19]
Ortalama Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	2.576	2.642	2.677	[15]
Gevşek Özgül Ağırlık (g/cm <sup>3</sup> )	1.61	1.40	1.41	[20]
Sıkı Özgül Ağırlık (g/cm <sup>3</sup> )	1.91	1.62	1.64	[20]
Mineral Fillerin Özgül Ağırlığı	<No 200 (0.075 mm)	2.65		[21]

Tablo 2. 50/70 Penetrasyon sınıfındaki bitümün fiziksel özellikleri

Bitüm Özellikleri		
Deney	Ortalama Değerler	Standart
Penetrasyon (25 °C)	AC 70	[22]
Parlama Noktası	180°C	[23]
Yanma Noktası	230 °C	[23]
Yumuşama Noktası	45.5°C	[24]
Düktilite (5 cm/dk)	>100 cm	[25]
Özgül Ağırlık	1.034	[26]



Şekil 1. Agregaların gradasyon eğrisi

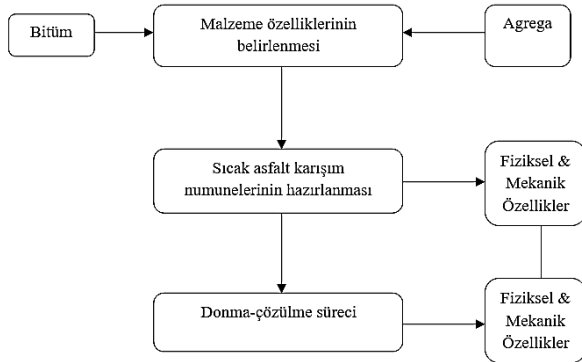
## 3. Metot

Çalışmada önce Asfalt Enstitüsü tarafından geliştirilen yöntem ile ön optimum bitüm miktarı belirlenmiştir. Ön optimum bitüm miktarı olarak belirlenen %5.5 optimum bitüm içeriği  $\pm$  %0,5 oranlarında azaltılıp çoğaltılarak %5.5  $\pm$  %0,5 her bitüm oranı için %4.5, %5, %5.5, %6 ve %6.5 bitüm içeriklerinde 3'er adet numune üretilmiş ve toplam 15 adet numune hazırlanmıştır.

Laboratuvar koşullarında üretilen asfalt betonu numuneleri için belirli miktarlarda (%4.5, %5, %5.5, %6 ve %6.5) bitüm kullanılarak yaklaşık 1250 gr ağırlığında agrega-bitüm karışımları hazırlanmıştır. Karışımların hazırlanması sırasında normal bir trafik akışı olduğu varsayılmış ve numuneler Marshall kompaktörde her iki tarafta 50 vuruş olacak şekilde sıkıştırılmıştır.

Laboratuvar ortamında hazırlanan asfalt beton numunelerine ASTM D-1559 standardına göre Marshall Stabilitesi (MS) testi yapılmıştır [27]. Testin sonucunda, asfalt betonu numuneleri için maksimum birim ağırlık değerini sağlayan bitüm oranı, maksimum MS değeri ile sonuçlanan bitüm oranı, %4 boşluk oranında elde edilen bitüm oranı (Vh) ve sıkıştırılmış asfalt betonu numunelerinde agrega içindeki boşlukların bağlayıcı ile doldurulma oranını (Vf) gösteren grafiğe göre %70'e karşılık gelen bitüm oranı alınmıştır.

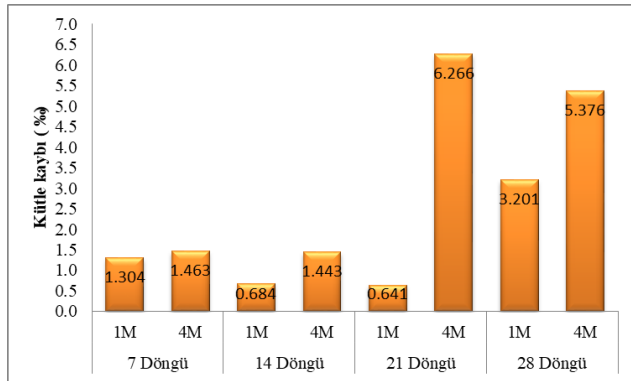
Laboratuvarda üretilecek asfalt betonu numunelerinde optimum bitüm oranı %5.75 olarak bulunmuştur. Optimum bitüm oranı (%5.75) kullanılarak şahit numune ile 7, 14, 21 ve 28 günlük döngüler için 1M ve 4M çözelti içeriğinde 3'er numune olacak şekilde toplamda 30 yeni Marshall numunesi hazırlanmıştır. Bu numuneler, donma ve çözülme etkisi altındaki performanslarını belirlemek için farklı periyotlarda ve farklı korozif ortamlarda donma ve çözülme döngülerine tabi tutulmuştur. Numunelerin donma ve çözülme döngüleri öncesi ve sonrası performanslarını belirlemek için bazı fiziksel ve mekanik testler yapılmıştır. Bu testler sonunda elde edilen değerler karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Deneysel çalışmayı özetleyen akış şeması Şekil 2'de verilmiştir.



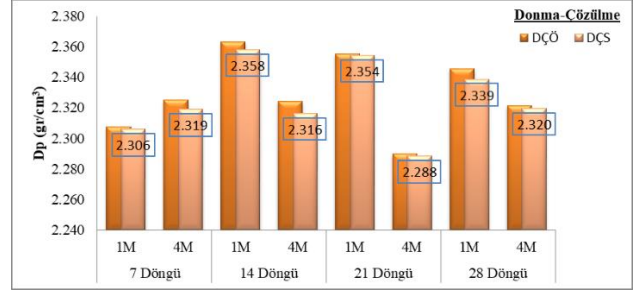
Şekil 2. Laboratuvar çalışmalarına ait akış şeması

#### 4. Bulgular ve Tartışma

Aşınma tabakası için uygulanan, donma-çözülmeden önce ve sonraki kütle kaybı Şekil 3'te gösterilmektedir. Donma-çözülme öncesi ve sonrası farklı aşındırıcı ortam için Dp değerlerini gösteren değerler ise Şekil 4'te gösterilmektedir. 4M tuz konsantrasyonu için bakıldığında 21 günlük döngünün kütle kaybının 28 günlük döngüden daha fazla olduğu anlaşılmaktadır (Şekil 3). Ayrıca daha yüksek hasarlı numunelerin daha düşük yoğunluğa sahip olduğu görülmektedir (Şekil 4).

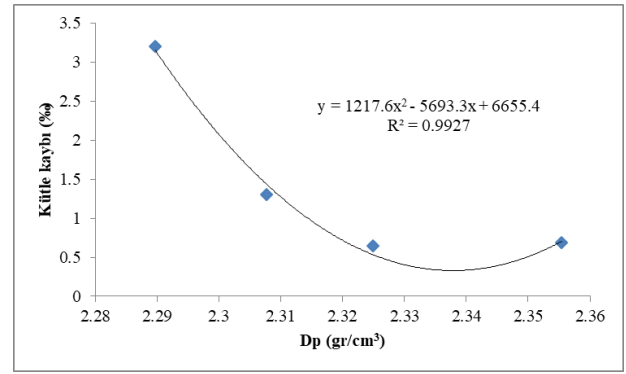


Şekil 3. Farklı aşındırıcı ortamlardan kaynaklanan asfalt betonunun kütle kaybı

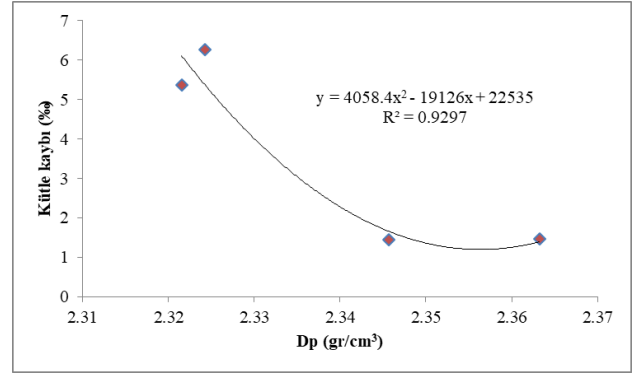


Şekil 4. Farklı aşındırıcı ortamlarda donma-çözülme sonrası asfalt betonun yoğunluk değişimi

Şekil 5'te 1M, Şekil 6'da 4M korozif koşullar için kütle kaybı ve yoğunluk arasındaki ilişki görülmektedir. R<sup>2</sup> değerleri 1M ve 4M için sırasıyla %99.27 ve %92.97'dir.

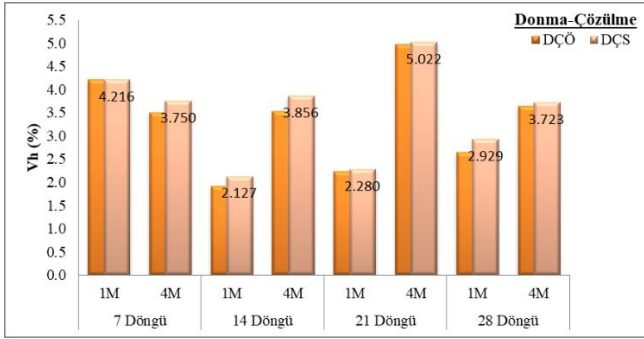


Şekil 5. 1M NaCl'de donma-çözülmeden sonra yoğunluk ve kütle kaybı arasındaki ilişki



Şekil 6. 4M NaCl'de donma-çözülme sonrası yoğunluk ve kütle kaybı arasındaki ilişki

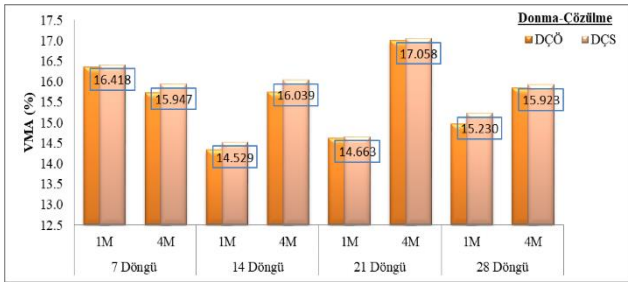
Donma ve çözülme döngülerinden önceki boşluk hacimlerinde ile donma ve çözülme döngülerinden sonraki boşluk hacimlerinde değişiklikler belirlenmiş ve Şekil 7'de gösterilmiştir.



Şekil 7. Asfalt betonu için donma-çözülmeden önce ve sonra Vh'deki değişim

1M solüsyondaki numuneler için 7, 14, 21 ve 28 gün süreyle donma ve çözülme etkisine maruz bırakıldıktan sonra Vh değerleri sırasıyla %0.00, %11.33, %2.01 ve %10.96 oranında artmıştır. 4M solüsyondaki numunelerde ise 7, 14, 21 ve 28 gün süreyle donma ve çözülme etkisine maruz bırakıldıktan sonra Vh değerleri sırasıyla %7.03, %9.21, %1.19 ve %2.25 oranında artış göstermiştir.

Sıkıştırılmış asfalt betonu numunelerinin agrega içindeki boşluk oranlarının (VMA) donma ve çözülme döngüleri öncesi ve sonrası değişimleri belirlenmiş ve Şekil 8'de gösterilmiştir.



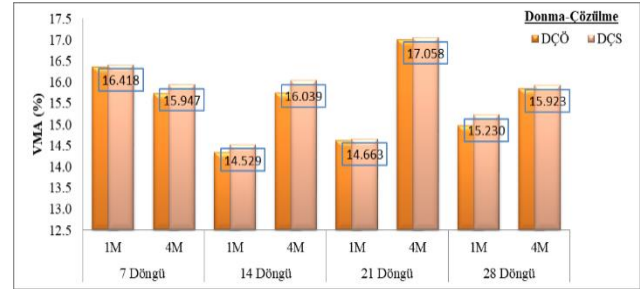
Şekil 8. Asfalt betonu için donma-çözülmeden önce ve sonra VMA'daki değişim

1M solüsyondaki numuneler için 7, 14, 21 ve 28. günlerde donma ve çözülme etkisine maruz kalmayan numunelerden elde edilen VMA değerleri sırasıyla %16.35, %14.34, %14.62 ve %14.98'dir. 7, 14, 21 ve 28 günlük donma ve çözülme döngülerine maruz kalan numunelerden elde edilen VMA değerleri ise sırasıyla %16.42, %14.53, %14.66 ve %15.23'tür. Dolayısıyla VMA değerleri 7, 14, 21 ve 28 gün süreyle donma ve çözülme etkisine maruz kaldıktan sonra sırasıyla %0.4, %1.32, %0.27 ve %1.69 artmıştır.

Diğer yandan 4M solüsyondaki numuneler için, 7, 14, 21 ve 28. günlerde donma ve çözülme etkisine maruz kalmayan numunelerden elde edilen VMA değerleri sırasıyla %15.73, %15.75, %17.01 ve %15.85'dir. 7, 14, 21 ve 28 günlük donma ve çözülme döngülerine maruz kalan numunelerden elde edilen VMA değerleri ise

sırasıyla %16.95, %16.04, %17.06 ve %15.92'dir. Dolayısıyla VMA değerleri 7, 14, 21 ve 28 gün süreyle donma ve çözülme etkisine maruz kaldıktan sonra sırasıyla %1.36, %1.80, %0.30 ve %0.45 artmıştır.

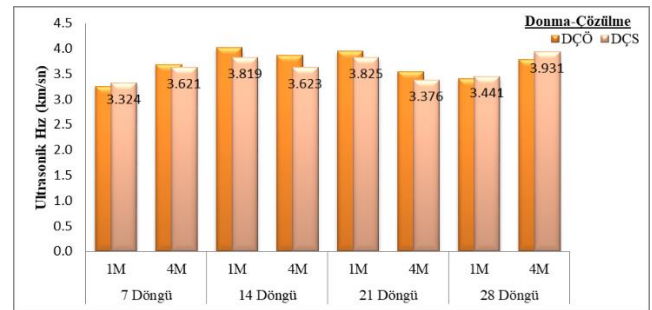
Şekil 9'da 1M ve 4M çözelti için donma ve çözülme döngülerinden önce ve sonra aşınma tabakası için belirlenen asfaltla dolu boşluk oranları (Vf) gösterilmektedir.



Şekil 9. Asfalt betonu için donma-çözülmeden önce ve sonra Vf'deki değişim

1M solüsyondaki numuneler için 7, 14, 21 ve 28 gün süreyle donma ve çözülme etkisine maruz bırakıldıktan sonra Vf değerleri sırasıyla %0.43, %1.51, %0.31 ve %1.80 azalmıştır. 4M solüsyondaki numunelerde ise 7, 14, 21 ve 28 gün süreyle donma ve çözülme etkisine maruz bırakıldıktan sonra Vf değerleri ise sırasıyla %1.59, %2.11, %0.31 ve %0.55 azaldığı görülmüştür.

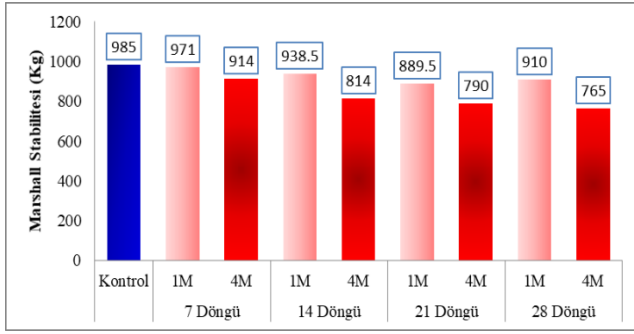
Donma ve çözülme döngülerinden önce ve sonra aşınma tabakası için gerçekleştirilen ultrasonik hız testlerinden elde edilen sonuçlar Şekil 10'da grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 10. Asfalt betonu için donma-çözülmeden önce ve sonra ultrasonik hızdaki değişim

Donma-çözülmeden önce ve sonra aşınma tabakası için belirlenen MS değerleri Şekil 11'de gösterilmektedir.





Şekil 11. Asfalt betonu için donma-çözülme sonrası MS'deki değişim

Donma ve çözülmeye maruz kalmayan şahit numunenin MS değeri 985 kg iken, 1M solüsyonda 7, 14, 21 ve 28 gün süreyle donma ve çözülme döngülerine maruz kalan numunelerin MS değerleri sırasıyla 971 kg, 938.5 kg, 889.5 kg ve 910 kg'dır. Bu nedenle MS değerlerinin şahit numuneye göre 7, 14, 21 ve 28 gün boyunca sırasıyla %1.42, %4.72, %9.70 ve %7.61 azaldığı görülmektedir.

Donma ve çözülmeye maruz kalmayan şahit numune için MS değeri 985 kg iken, 4 M solüsyonda 7, 14, 21 ve 28 gün süreyle donma ve çözülme döngülerine maruz kalan numunelerin MS değerleri sırasıyla 914 kg, 814 kg, 790 kg ve 765 kg'dır. MS değerlerinin şahit numuneye göre 7, 14, 21 ve 28 gün boyunca sırasıyla %7.21, %17.36, %19.79 ve %22.34 oranında azaldığı anlaşılmaktadır.

## 5. Sonuçlar

Bu çalışmada, 1M ve 4M'lük NaCl çözeltisinde 7, 14, 21, 28 günlük donma ve çözülme döngülerine maruz kalan asfalt beton numunelerinin mühendislik özellikleri incelenmiştir. Bu çerçevede elde edilen sonuçlar mekanik ve fiziksel özellikler açısından değerlendirilmiştir. Deneysel çalışma ve hesaplamalar yoluyla elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir:

1. 4M tuz konsantrasyonu için 21 günlük döngünün kütle kaybı, 28 günlük döngüden fazladır. Ayrıca daha yüksek hasarlı numunelerin daha düşük yoğunluğa sahip olduğu görülmektedir.
2. Kütle kaybı ve yoğunluk arasındaki ilişkiler korozif koşullar için 1M ve 4M için sırasıyla %99.27 ve %92.97 korelasyon değerleri olarak elde edilmiştir.
3. 1M solüsyondaki numunelerin 7, 14, 21 ve 28. günlerde donma ve çözülme etkisine maruz kalmayan numuneler için elde edilen VMA değerleri sırasıyla %16.35, %14.34, %14.62 ve %14.98'dir. 7, 14, 21 ve 28 günlük donma ve çözülme döngülerine maruz kalan numuneler için elde edilen VMA değerleri ise

sırasıyla %16.42, %14.53, %14.66 ve %15.23'tür. Bu nedenle VMA değerleri 7, 14, 21 ve 28 gün süreyle donma ve çözülme etkisine maruz kaldıktan sonra sırasıyla %0.4, %1.32, %0.27 ve %1.69 artmıştır.

4. 7, 14, 21 ve 28. günlerde donma ve çözülme etkisine maruz kalmayan numuneler için elde edilen VMA değerleri 4M solüsyonda sırasıyla %15.73, %15.75, %17.01 ve %15.85'dir. 7, 14, 21 ve 28 günlük donma ve çözülme döngülerine maruz kalan numuneler için elde edilen VMA değerleri ise sırasıyla %16.95, %16.04, %17.06 ve %15.92'dir. Dolayısıyla 7, 14, 21 ve 28 gün süreyle donma ve çözülme etkisine maruz bırakılan VMA değerleri sırasıyla %1.36, %1.80, %0.30 ve %0.45 artmıştır.
5. Donma ve çözülmeye maruz kalmayan referans numunenin MS değeri 985 kg iken 4M solüsyonda 7, 14, 21 ve 28 gün süreyle donma ve çözülme döngüsüne maruz kalan numunelerin MS değerleri sırasıyla 914 kg, 814 kg, 790 kg ve 765 kg'dır. MS değerlerinin, referans numuneye göre 7, 14, 21 ve 28 gün için sırasıyla %7.21, %17.36, %19.79 ve %22.34 oranında düştüğü görülmüştür.

Yapılan çalışmada soğuk iklimli bölgelerde donma-çözülme etkisinin asfalt beton üzerindeki olumsuz etkileri araştırılmıştır. Sıcak karışım asfalt dizaynının amacı optimum bitüm miktarını bulmaktır. Optimum bitüm miktarı bulunurken %3.5-4.0-4.5-5.0-5.5-6.0-6.5 bitüm oranlarında Marshall briketleri hazırlanmaktadır. Hazırlanan numunelere Marshall sıcak karışım tasarım yöntemi prosedürü uygulanarak bitüm oranı-stabilite, bitüm oranı-akma, bitüm oranı-Dp, bitüm oranı-Vfa yüzdesi, bitüm oranı-boşluk yüzdesi, bitüm oranı-VMA yüzdesi grafikleri hazırlanıp pratik özgül ağırlığı maksimum yapan bitüm oranı, stabiliteyi maksimum yapan bitüm oranı, Vh değerinin %4 olduğu bitüm içeriği ve son olarak Vfa'nın %70 olduğu bitüm içeriği değerlerinin ortalaması alınarak belirlenmektedir. Bu çalışmada donma-çözülme döngüsünün asfalt betonun stabilitesinde azalmaya neden olduğu görülmüştür. Bu nedenlerle sıcak karışım dizaynı yapılırken dikkate alınan değerler soğuk bölgelerde yol inşaatı yapılırken farklı seçenekler göz önüne alınmalıdır.

## Kaynaklar

- [1] Nixon WA, Wei Y. *Optimal Usage of De-icing Chemicals When Scraping Ice*. Final Report for TR-459. TA1/IIHR/434. 1, University of Iowa, 128p, 2003.



- [2] Blackburn RR, Bauer KM, Amsler DE, Boselly SE and McElroy AD. *Snow and Ice Control: Guidelines for Materials and Methods*. NCHRP Report 526. Midwest Research Institute, 2004.
- [3] Walker D. The Truth about Sand and Salt for Winter Maintenance, *Salt and Highway Deicing Newsletter*, Vol. 42 No. 2, 2005.
- [4] Boselly SE. Benefit/cost study of RWIS and anti-icing technologies. *National Cooperative Highway Research Program Report No. 20-7(117)*, 2001.
- [5] Fischel M. Evaluation of Selected Deicers Based on a Review of the Literature, 2001.
- [6] Shi X, & O'Keefe K. Synthesis of Information on Anti-Icing and Pre-Wetting for Winter Highway Maintenance Practices in North America. *Pacific Northwest Snowfighters in collaboration with the Washington State Department of Transportation*, 2005.
- [7] Blackburn RR, McGrane EJ, Chappelow CC, Harwood DW, & Fleege EJ. *Development of anti-icing technology* (No. SHRP-H-385). Washington, DC: Strategic Highway Research Program, National Research Council, 1994.
- [8] Vitaliano DF. An economic assessment of the social costs of highway salting and the efficiency of substituting a new deicing material, *Journal of Policy Analysis and Management*, vol. 11, issue 3, pages 397-418, 1992.
- [9] Perchanok MS. An Approach to Terrain Classification to Improve Road Condition Forecasts of Maintenance Decision Support Systems. *Surface Transportation Weather and Snow Removal and Ice Control Technology*, 337, 2008.
- [10] Warrington PD. *Roadsalt and Winter Maintenance for British Columbia Municipalities. Best Management Practices to Protect Water Quality*. Environmental Protection Agency, December 1998.
- [11] Fay L, Volkening K, Gallaway C, & Shi X. Performance and impacts of current deicing and anti-icing products: User perspective versus experimental data. In *87th annual meeting of the transportation research board, Washington, DC* (pp. 1-22), 2008.
- [12] Koefod, S. Eutectic depressants. *Surface Transportation Weather and Snow Removal and Ice Control Technology*, 73, 2008.
- [13] Nixon WA, Williams AD. A Guide for Selecting Anti-icing Chemicals. Ver. 1.0. *IIHR Technical Report No. 420*, 2001.
- [14] Müdürlüğü KG. Karayolu Teknik Şartnamesi. *Ankara, Türkiye, KTŞ*. 2013.
- [15] ASTM C127-12. Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012.
- [16] ASTM C131-06. Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2006.
- [17] ASTM C117-04. Standard Test Method for Materials Finer than 75- $\mu\text{m}$  (No. 200) Sieve in Mineral Aggregates by Washing, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2004.
- [18] ASTM C40/C40M-11. Standard Test Method for Organic Impurities in Fine Aggregates for Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2011.
- [19] ASTM C88-05. Standard Test Method for Soundness of Aggregates by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2005.
- [20] ASTM C29/C29M-09. Standard Test Method for Bulk Density ("Unit Weight") and Voids in Aggregate, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2009.
- [21] ASTM C854. Standard Test Method for Resistance to External Loads on Metal Reflective Pipe Insulation, 1990.
- [22] ASTM D5-06e1. Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2006.
- [23] ASTM D92-12. Standard Test Method for Flash and Fire Points by Cleveland Open Cup Tester, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012.
- [24] ASTM D36/D36M-12. Standard Test Method for Softening Point of Bitumen (Ring-and-Ball Apparatus), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012.
- [25] ASTM D113-07. Standard Test Method for Ductility of Bituminous Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2007.
- [26] ASTM D70-09e1. Standard Test Method for Density of Semi-Solid Bituminous Materials (Pycnometer Method), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2009.
- [27] ASTM D1559-89. Standard test method for resistance to plastic flow of bituminous mixtures using Marshall apparatus, Annual Book of ASTM Standards, USA, 1992.

Araştırma Makalesi/Research Article

## Comparative assessment of solar energy-based transcritical CO<sub>2</sub> Rankine cycles for different layouts

Serpil ÇELİK TOKER <sup>ID</sup>\*1, Önder KIZILKAN <sup>ID</sup>1

<sup>1</sup>Isparta University of Applied Sciences, Faculty of Technology, Department of Mechanical Engineering, 32200, Isparta, Turkey

### Keywords

Evacuated U-tube solar collector  
Transcritical CO<sub>2</sub> Rankine cycle  
Energy  
Exergy

### Makale geçmişi:

Geliş Tarihi: 01.09.2022  
Kabul Tarihi: 16.11.2022

**Abstract:** In this study, different transcritical CO<sub>2</sub> Rankine (tCO<sub>2</sub>-RC) cycles with vacuum tube solar collectors are examined. In this context, the transcritical CO<sub>2</sub> Rankine cycle in different configurations, such as simple, regenerator, reheat, regenerator, and reheat, which is widely used in the literature, has been chosen. First, the energy and exergy efficiencies of the cycles were founded by performing thermodynamic analyzes of four various tCO<sub>2</sub>-RCs under certain operating parameters. Moreover, parametric studies were carried out according to the factors affecting the system performance, like turbine input temperature and input pressure of the turbine. Both analyzes and parametric studies were conducted utilizing the Engineering Equation Solver (EES) computer program. As outcomes of analyzes, the highest thermal efficiency was founded for the tCO<sub>2</sub>-RC with reheat and regenerator by 11.8%, and the lowest energy efficiency was calculated for the simple tCO<sub>2</sub>-RC and tCO<sub>2</sub>-RC with reheat by approximately 6.6%. While all tCO<sub>2</sub>-RCs' energy and exergy efficiencies increased with the rise of the turbine's input pressure, the energy and exergy efficiency of all tCO<sub>2</sub>-RCs decreased with the rise of the pump's input pressure.

### Atıf için/To Cite

Toker S.Ç., Kızıllkan Ö. Comparative assessment of solar-based transcritical CO<sub>2</sub> Rankine cycles for different layouts. International Journal of Technological Sciences, 14(2), 94-102, 2022.

## Güneş enerjisi kaynaklı farklı transkritik CO<sub>2</sub> Rankine çevrimlerinin karşılaştırılması

### Anahtar Kelimeler

Vakum tüplü U borulu güneş kolektörü  
Transkritik CO<sub>2</sub> Rankine çevrimi  
Enerji  
Ekserji

### Article history:

Received: 01.09.2022  
Accepted: 16.11.2022

**Özet:** Bu çalışmada, vakum tüplü güneş kolektörlü farklı transkritik CO<sub>2</sub> Rankine çevrimleri incelenmiştir. Bu kapsamda literatürde yaygın olarak kullanılan basit, rejeneratör, yeniden ısıtmalı, rejeneratör ve yeniden ısıtmalı transkritik CO<sub>2</sub> Rankine çevrimleri seçilmiştir. İlk olarak, belirli çalışma parametreleri altında dört farklı transkritik CO<sub>2</sub> Rankine çevriminin termodinamik analizleri yapılarak sistemlerin enerji ve ekserji verimleri hesaplanmıştır. Ayrıca türbin giriş sıcaklığı ve türbin giriş basıncı gibi sistem performansını etkileyen faktörlere göre parametrik çalışmalar yapılmıştır. Hem analizler hem de parametrik çalışmalar EES bilgisayar programı kullanılarak yapılmıştır. Termodinamik analizler sonucunda en yüksek enerji verimi % 11.8 ile yeniden ısıtmalı ve rejeneratörlü transkritik CO<sub>2</sub> Rankine çevrimi için, en düşük enerji verimi ise % 6.6 ile basit transkritik CO<sub>2</sub> Rankine çevrimi ve yeniden ısıtmalı transkritik CO<sub>2</sub> Rankine çevrimi için hesaplanmıştır. Tüm transkritik CO<sub>2</sub> Rankine çevrimlerinin enerji ve ekserji verimleri türbin giriş basıncının artmasıyla artarken, tüm transkritik CO<sub>2</sub> Rankine çevrimlerinin enerji ve ekserji verimi pompa giriş basıncının artmasıyla azalmıştır.

## 1. Introduction

In recent years, rapid population growth, industrialization, and technological advances have raised the demand for energy consumed. Fossil fuels meet a significant portion of the growing energy demand. Critical environmental issues like greenhouse impacts, climate alteration, depletion of ozone, and global heating are brought on by fossil fuel consumption. These shortcomings of fossil fuels have recently increased interest in renewable energy resources. Solar energy has long been recognized as one of the most promising alternative energy resources. Moreover, to the utilization of alternative energy resources, the economical and effective use of low and high-temperature heat is more important [1]. Due to its simplicity, relatively low initial costs, and suitability for low/medium temperature heat resources, the organic Rankine cycle (ORC) is an effective and affordable method for generating electricity. In addition, these systems can be integrated into many systems, like solar energy, geothermal energy, and waste heat [2]. Many conventional ORCs use working fluids such as CFC, HCFC, and HFC. Unfortunately, these fluids have high global warming potential (GWP) and ozone depletion potential (ODP) [3]. Additionally, flammable organic liquids at high temperatures might cause major safety concerns [4]. In addition, in ORC, where organic fluids are used, a pinching point problem occurs between the heat source and the working fluid, and this causes an increase in irreversibility in the system. [5]. Therefore, the use of CO<sub>2</sub>, which is both environmentally friendly and has good heat transfer properties, has increased in recent years. CO<sub>2</sub> is abundant, inexpensive, non-toxic, and beneficial to the environment. Additionally, CO<sub>2</sub> has good thermal compatibility with the heat source and enough thermal stability to tolerate its high temperatures [6]. CO<sub>2</sub>, which is natural, inexpensive, and has a low critical temperature and pressure, has been investigated by many researchers as a supercritical agent fluid. However, the CO<sub>2</sub>'s low critical temperature characteristic has the disadvantage that in the tCO<sub>2</sub>-RC, it is hard to condense turbine exhaust gas to liquid at subcritical pressure. The research group of Zhang et al. [7] has conducted significant research work to improve and test the solar energy-based CO<sub>2</sub> Rankine cycle. Al-Zahrani et al. [8] investigated the performance of a combined system based on geothermal energy for the production of electricity, hydrogen, and heat. The combined cycle consists of an ORC, an electrolyzer, and a tCO<sub>2</sub>-RC. They calculated the tCO<sub>2</sub>-RC's efficiency as 9.2% at a geothermal water temperature of 200 °C. They calculated the integrated cycle's energy efficiency as 13.67% and the exergy efficiency as 32.27%. Bamisile et al. [9] investigated the multigeneration's thermodynamic analysis made of a parabolic collector, a supercritical CO<sub>2</sub> Brayton cycle (sCO<sub>2</sub> BC), a tCO<sub>2</sub>-RC,

and a cascade cooling cycle. They calculated the tCO<sub>2</sub>-RC's energy efficiency as 16.17% and the exergy efficiency as 5.53%, according to the results of the analysis. Cayer et al. [10] have done a detailed analysis of a tCO<sub>2</sub>-RC using industrial low-temperature process heat as the heat resource. They found the efficiency of the tCO<sub>2</sub>-RC with a regenerator as 8.5% and the efficiency of the tCO<sub>2</sub>-RC without the regenerator as 7.3%, at a high pressure of 10 MPa. Pan et al. [11] established the tCO<sub>2</sub>-RC using a rotary piston expander in vitro. They carried out experimental studies about operating parameters, electrical power, and efficiency. The experimental analysis revealed that when the high pressure is around 11 MPa and the low pressure is approximately 4.6 MPa, the constant net power production is approximately 1100W, and the system's thermal efficiency is 5.0%. Shu et al. [12] compared tCO<sub>2</sub>-RC with a regenerator, reheat, and regenerator, and ORC with a regenerator, reheat, and regenerator for engine waste heat recovery. They used R123 as the working fluid in the ORC. They reported that by rising the turbine input temperature from 500 K to 1000 K, the thermal efficiency of the tCO<sub>2</sub>-RC with reheat and regenerator increased 184% more than the tCO<sub>2</sub>-RC with a regenerator. Additionally, they claimed that at maximum turbine input temperature, the tCO<sub>2</sub>-RC with reheat and regenerator had a greater thermal efficiency than the ORC with reheat and regenerator. Yamaguchi et al. [13] examined the analysis of the solar energy-assisted tCO<sub>2</sub>-RC. For the analysis, meteorological data from Japan, Kyoto, and typical summer and winter season days were used. While they determined that the solar energy-based tCO<sub>2</sub>-RC had an efficiency of 3.4% for the winter and 5.78% for the summer, they found that the power generation was 0.118 kW for the winter and 0.177 kW for the summer. Using parabolic solar energy collectors, Sarmiento et al. [14] investigated the functionality of the solar energy-driven tCO<sub>2</sub>-RC. The thermodynamic performance of the solar energy-aided tCO<sub>2</sub>-RC with reheat was examined by Al-Zahrani and Dincer [15]. The investigated system was made of a parabolic solar collector, thermal energy storage, tCO<sub>2</sub>-RC, and an absorption cooling system. The efficiency of the power cycle and the integrated system are both assessed in relation to variations in cycle temperature and pressure. They determined that the tCO<sub>2</sub>-RC had an energy and exergy efficiency of 34% and 82%, respectively. The thermodynamic analysis of the solar energy-driven tCO<sub>2</sub>-RC for electricity and heat production, as well as the optimization of the integrated system, was conducted by Kizilkan et al. [16]. They examined the performance of the integrated cycle monthly using the EES program. Following their investigation, they calculated the combined system's best energy and exergy efficiencies during the months of July and August. They found the maximum turbine output as 0.269 kW for the month of July. Liang et al.

[17] proposed a zero-emission fuel cell-based multigeneration system combined with the ORC and the tCO<sub>2</sub>-RC. Shu et al. [4] compared four different transcritical CO<sub>2</sub> Rankine cycles: simple tCO<sub>2</sub>-RC, tCO<sub>2</sub>-RC with a regenerator, tCO<sub>2</sub>-RC with reheat, tCO<sub>2</sub>-RC with a regenerator, and reheat. They indicated that the performance of the tCO<sub>2</sub>-RC with reheat and regenerator was the highest. Akbari [18] made comprehensive exergy and exergo-economic analysis of the integrated cycle made of the tCO<sub>2</sub>-RC, the Stirling power system, and the liquefied natural gas process. Other theoretical work was done by Naseri et al. [19] concerning the renewable energy - driven tCO<sub>2</sub>-RC for the production of hydrogen and hot water. Meng et al. [20] investigated the thermo-economic performances of geothermal energy based various tCO<sub>2</sub>-RCs. They also compared the tCO<sub>2</sub>-RC by the ORC and Kalina systems. They stated that the efficiency of the tCO<sub>2</sub>-RC with reheat was higher than the other tCO<sub>2</sub>-RCs. Moreover, they reported that while the net power generation of the tCO<sub>2</sub>-RC with a reheat is much better than that of the Kalina system and ORC, the energy efficiency of the tCO<sub>2</sub>-RC with a reheat is 36.9% lower than that of ORC.

In this paper, the performances of four various configurations of the tCO<sub>2</sub>-RC with vacuum tube solar collector are compared. The lack of thermodynamic analysis and comparison of tCO<sub>2</sub>-RCs with vacuum tube solar collectors is the reason for the development of this article. Thermodynamic analysis of all transcritical CO<sub>2</sub>

Rankine cycles was carried out, taking into account the accepted system operating parameters. In addition, the evacuated U-tube solar collector's dynamic analysis was made. Using the Isparta meteorological data, the CO<sub>2</sub> outlet temperatures from the collector were calculated. Moreover, the effects of the pump input pressure, input pressure of the turbine, and the turbine's input temperature on cycle performance were investigated using parametric analyses. As a result of the analyses, the performances of the tCO<sub>2</sub>-RCs and wherewith the design parameters affecting the cycle affect the performance were examined.

## 2. System Description

Schematic representations of four various tCO<sub>2</sub>-RCs are shown in Figure 1; simple tCO<sub>2</sub>-RC, tCO<sub>2</sub>-RC with reheat, tCO<sub>2</sub>-RC with a regenerator, and tCO<sub>2</sub>-RC with reheat and regenerator. To make more use of energy, the tCO<sub>2</sub>-RC with reheat cycle has been developed; in this cycle, the fluid exiting the first turbine then enters the evaporator again to be reheated. After reheating, it enters the second turbine (Figure 1b). Likewise, a heat exchanger has been added to the simple tCO<sub>2</sub>-RC to improve its performance, as seen in (Figure 1c, in order to make use of the excess heat energy. The final cycle is a combination of second and third cycles, which combine reheat and regeneration processes.

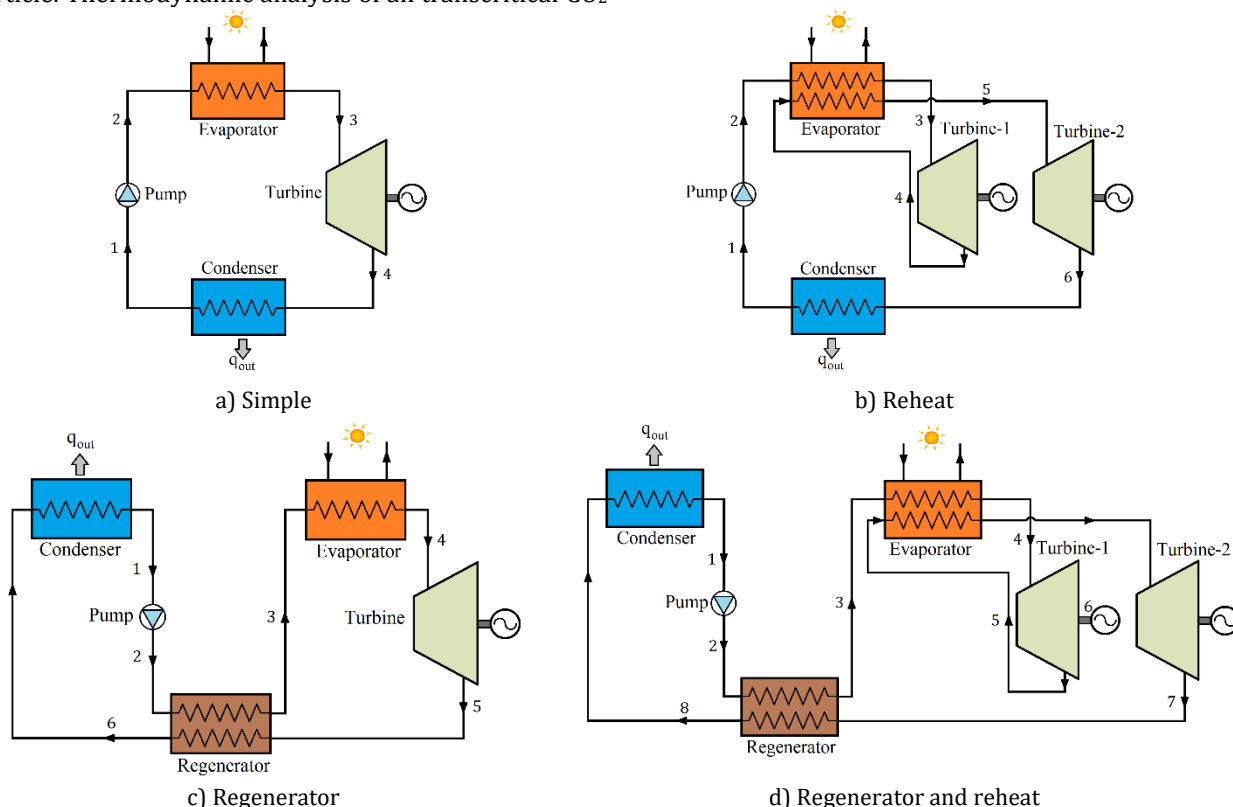


Figure 1. Different tCO<sub>2</sub>-RC layouts

In the simple cycle, the heat needed for the tCO<sub>2</sub>-RC is supplied from evacuated solar collectors. The 15 collector units that make up the solar collector system each have 13 U-type pipes. A U-tube system consists of two nested borosilicate glasses, an absorber surface, a fin, a U-shaped pipe, and a working fluid (Figure 2). The tCO<sub>2</sub>-RC operates on the general operating principle described below: The agent fluid coming from the condenser output is pressurized via a pump. Then, the working fluid, CO<sub>2</sub>, heats up and reaches the supercritical phase while directly the evacuated solar collectors. Work is produced by passing the fluid, which has high pressure and temperature, through the turbine. The condenser receives the low-pressure fluid that expands from the turbine. In the condenser, the fluid condenses before being returned to the pump. Thus, the cycle is completed.

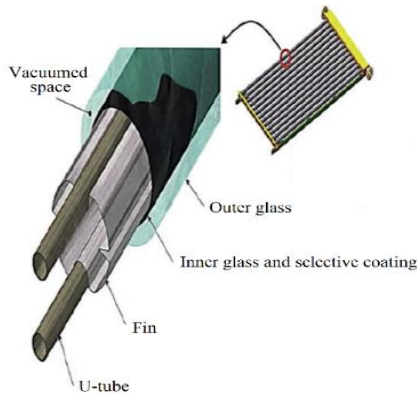


Figure 2. Evacuated U-tube solar collector's cross-section

The variation of the thermophysical characteristics of CO<sub>2</sub> with the temperature at 9000 kPa pressure is depicted in Figure 3. The thermophysical characteristics of CO<sub>2</sub> exhibit sudden changes close to the critical point, as seen in Figure 2. Due to its unique thermophysical properties, supercritical CO<sub>2</sub> has a greater heat transfer property than the liquid and gas phases.

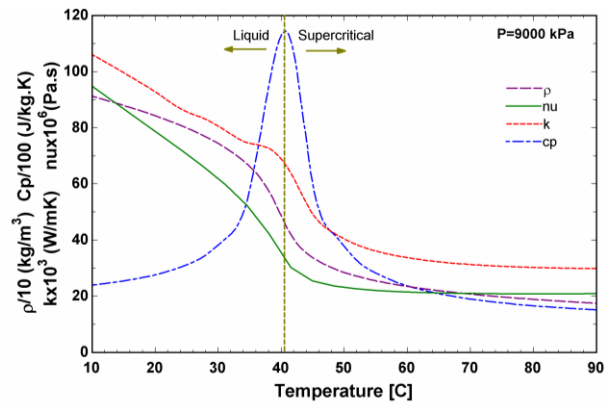


Figure 3. Thermophysical properties of supercritical CO<sub>2</sub> at 9 MPa

Table 1 provides the design parameters that were utilized to compare the performance of the evacuated tube solar collectors based tCO<sub>2</sub>-BC.

Table 1. Operating parameters of transcritical CO<sub>2</sub> Rankine cycle

Parameter	Value
Input temperature of the turbine, °C	150
Outlet pressure of turbine, kPa	6500 [21]
Effectiveness of heat exchanger, %	98 [23]
Turbine's isentropic efficiency, %	90 [22]
Pump's isentropic efficiency, %	85 [15]
Pressure ratio	1.5 [21]

### 3. Thermodynamic Modelling

Various tCO<sub>2</sub>-RCs' energy and exergy analyzes were performed using the EES program [24]. To simplify the computation and its complexity, some assumptions are made.

- Every component is taken into account as a steady-state system.
- It is assumed that there are no kinetic and potential energy changes in the system.
- Heat losses and pressure drops in the pipes are neglected.
- It is acknowledged that the condenser outlet has a saturated liquid.
- The reference state properties are 25°C and 101.325 kPa.

The Ref. [25] is primarily the basis for the design considerations of the solar collector system shown here. The following is a definition of the beneficial solar energy collected:

$$\dot{Q}_u = F_R [S A_{ap} - A_r U_L (T_{in} - T_a)] \quad (1)$$

Here  $F_R$  is the collector heat removal factor,  $S$  is the solar irradiation,  $A_{ap}$  is the collector aperture area,  $A_r$  is the

receiver area, U<sub>L</sub> is the entire heat loss coefficient of the collector between ambient and absorber surface, T<sub>in</sub> is the agent fluid input temperature, and T<sub>a</sub> is the ambient temperature.

The useable energy gathered by the evacuated U-tube solar collector can be expressed like the following to define the CO<sub>2</sub> temperature at the collector outlet :

$$\dot{Q}_u = \dot{m}C_p(T_{out} - T_{in}) \quad (2)$$

More details on finding useful heat from evacuated solar collectors can be found in Ref. [26].

The mass and energy balance equilibriums for systems with the continuous flow are written as follows in [27]:

$$\sum \dot{m}_{in} = \sum \dot{m}_{out} \quad (3)$$

$$\sum \dot{m}_{in} \left( h + \frac{v^2}{2} + gz \right)_{in} + \sum \dot{Q}_{in} + \sum \dot{W}_{in} = \sum \dot{m}_{out} \left( h + \frac{v^2}{2} + gz \right)_{out} + \sum \dot{Q}_{out} + \sum \dot{W}_{out} \quad (4)$$

here,  $\dot{m}$  represents the fluid mass flow rate, and the circumstances at the input and output are denoted by the subscripts "in" and "out," respectively. Heat transfer rate  $\dot{Q}$ , power transfer rate  $\dot{W}$ , specific enthalpy  $h$ , speed  $v$ , altitude  $z$ , and gravitational acceleration  $g$  are all variables.

Entropy and exergy balance equality can be described as [28]:

$$\sum \dot{m}_{in} s_{in} + \sum \frac{\dot{Q}}{T} + \dot{S}_{gen} = \sum \dot{m}_{out} s_{out} \quad (5)$$

$$\sum \dot{m}_{in} ex_{flow} + \sum \dot{E}x_{in}^Q + \sum \dot{E}x_{in}^W = \sum \dot{m}_{out} ex_{flow} + \sum \dot{E}x_{out}^Q + \sum \dot{E}x_{out}^W + \dot{E}x_{dest} \quad (6)$$

Here,  $ex_{flow}$  denotes current exergy,  $\dot{E}x^Q$  indicates heat exergy,  $\dot{E}x^W$  shows work exergy and  $\dot{E}x_{dest}$  represents exergy irreversibility. Each term given in the previous equation is described as follows:

$$ex_{flow} = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \quad (7)$$

$$\dot{E}x^W = \dot{W} \quad (8)$$

$$\dot{E}x^Q = \dot{Q} \left( \frac{T - T_0}{T} \right) \quad (9)$$

$$\dot{E}x_{dest} = T_0 \dot{S}_{gen} \quad (10)$$

The energy and exergy efficiency equilibrium for all the tCO<sub>2</sub>-RC can be written as follows:

$$\eta_{energy} = \frac{W_{net}}{Q_{in}} \quad (11)$$

$$\eta_{exergy} = \frac{\dot{E}x_{W_{net}}}{\dot{E}x_{Q_{in}}} \quad (12)$$

#### 4. Validation

Al-Zahrani et al. [8]'s work in the literature was used to confirm the thermodynamic analysis of the studied tCO<sub>2</sub>-RC with reheat and regenerator. The change in energy efficiency with regard to the turbine inlet pressure was investigated parametrically by accepting the design parameters of the reference research. A comparison of the reference work [8] and current study is given in Figure 4. The figure shows that the tCO<sub>2</sub>-RC's calculated energy efficiency for the current investigation and the reference study are equivalent to one another.

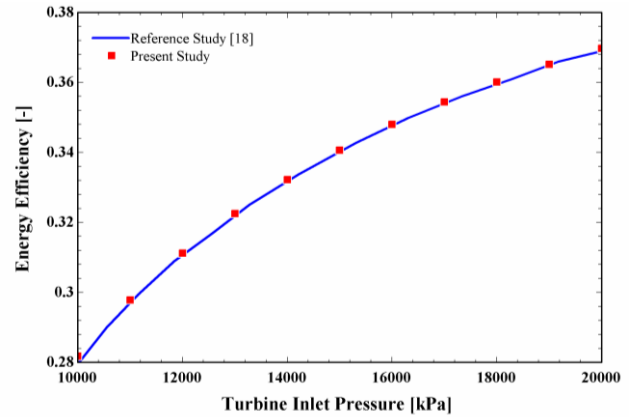


Figure 4. Validation of tCO<sub>2</sub>-RC with regenerator and reheat

#### 5. Results and Discussions

In this research, the performance of four various tCO<sub>2</sub>-RCs integrated into an evacuated U-tube solar collector was investigated. In both the evacuated solar collector and the transcritical Rankine cycle, natural eco-friendly CO<sub>2</sub> was used. Finally, parametric studies were conducted for the factors affecting the system performance. Analyzes and parametric studies were made using the EES computer program. In Table 2, the values of pressure, temperature, mass flow rate, enthalpy, and entropy for the state points of the tCO<sub>2</sub> RC with reheat and regenerator are given.

Figure 5 displays the exit temperature of CO<sub>2</sub> from the collector for a typical summer day. Using the meteorological data of July 15, a typical summer day in Isparta city, Turkey, the CO<sub>2</sub> temperature from the evacuated U-tube solar collector was calculated. The figure shows that at noon, the CO<sub>2</sub> temperature soared to a maximum of 194°C.



Table 2. Thermodynamic properties of each point in the tCO<sub>2</sub>-RC with regenerator and reheat

State	P [kPa]	T [°C]	h [kJ/kg]	s [kJ/kgK]	ṁ [kg/s]	e [kJ/kg]
1	6500	25.44	-230	-1.484	1.00	212.8
2	10000	33.14	-224.4	-1.482	1.00	217.6
3	10000	58.21	-87.4	-1.051	1.00	226.4
4	10000	150	65.17	-0.637	1.00	255.6
5	8062	131.1	52.18	-0.634	1.00	241.6
6	8062	150	74.86	-0.579	1.00	247.9
7	6500	131.5	61.46	-0.576	1.00	233.4
8	6500	35.11	-75.49	-0.968	1.00	213.5

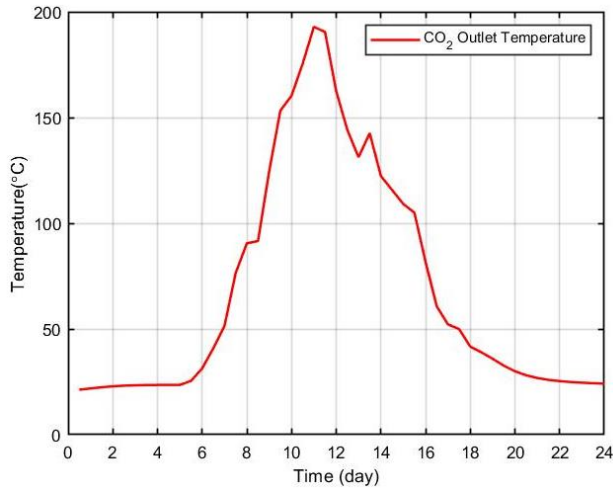


Figure 5. Variation of exit temperature of CO<sub>2</sub> from the collector

The system operating characteristics were taken into consideration when calculating the energy and exergy efficiency of various tCO<sub>2</sub>-RCs. Figure 6 provided the energy and exergy efficiencies of all tCO<sub>2</sub>-RCs. The highest efficiency was calculated for the transcritical Rankine cycle with regenerator and reheat under certain operating parameters. It was followed by the Rankine cycle with a regenerator, the simple tCO<sub>2</sub>-RC, and the tCO<sub>2</sub>-RCs with reheat.

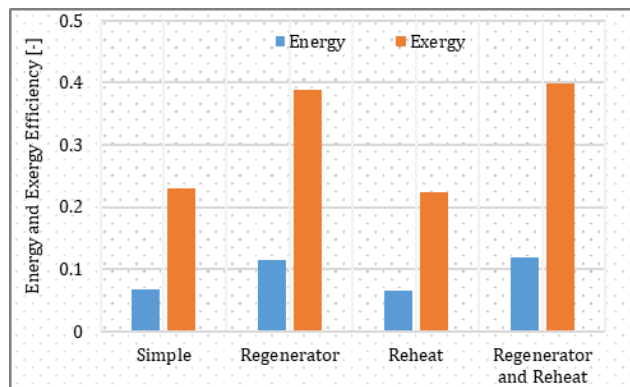


Figure 6. Energy and exergy efficiencies of various tCO<sub>2</sub>-RCs

Figure 7 shows how the cycles' energy efficiency varies in regard to the temperature of the turbine inlet. The

thermodynamic analysis revealed that the tCO<sub>2</sub>-RC with regenerator and reheat had the best efficiency while the tCO<sub>2</sub>-RC with reheat had the lowest efficiency. With the rise of turbine input temperature, the efficiency of the tCO<sub>2</sub>-RC with regenerator, regenerator, and reheat raised at a higher rate, while the increment in the tCO<sub>2</sub>-RC with reheat and simple was very small.

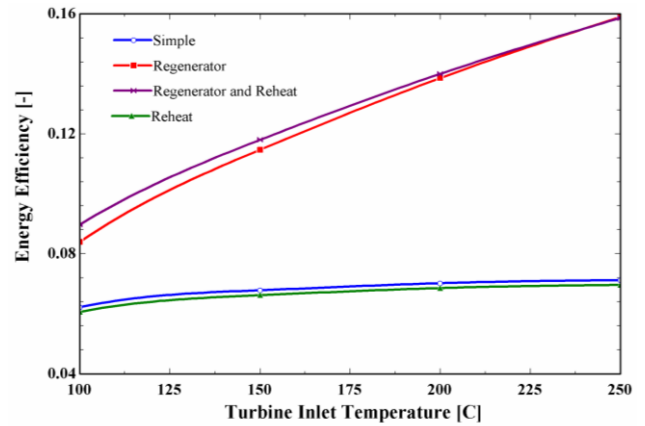


Figure 7. Effect of turbine inlet temperature on energy efficiency

Figure 8 depicts how the cycles' energy efficiency varies as a function of the turbine input pressure. The net power generated by the system will rise as the turbine input pressure rises, increasing the efficiency of all tCO<sub>2</sub>-RCs. The highest efficiency is in the tCO<sub>2</sub>-RC with regenerator and reheat, and the lowest efficiency is in the tCO<sub>2</sub>-RC with reheat. All tCO<sub>2</sub>-RCs have fairly similar energy efficiencies when the turbine input pressure is less than about 9500 kPa. However, the distinction among the efficiency of the tCO<sub>2</sub>-RCs started to rise as the turbine inlet pressure increased above 9500 kPa.

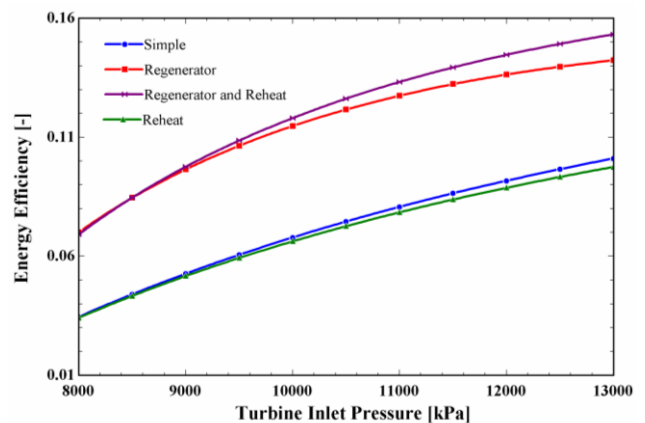


Figure 8. Effect of turbine inlet pressure on energy efficiency

The input pressure of the pump is another significant factor that The all tCO<sub>2</sub>-RCs' energy efficiency decreased with the rise of pump input pressure. Figure



9 displays the impact of pump input pressure on energy efficiency. The quantity of work generated by the system will decrease as the pressure range in the turbine narrows with an increase in pump inlet pressure. This state will result in a decline in the energy efficiency of the tCO<sub>2</sub>-RC.

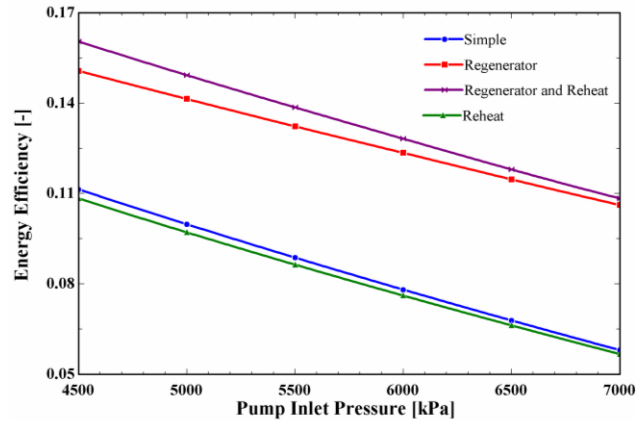


Figure 9. Effect of pump inlet pressure on energy efficiency

In Figure 10, the exergy changes of the cycles according to the turbine input temperature were given. As the turbine's input temperature raised from 100°C to 250°C, the network produced in all cycles, and the amount of heat entering the system raised. However, since the rising in the quantity of input heat is more than the network, the exergy efficiency of all cycles decreased according to the input temperature of the turbine.

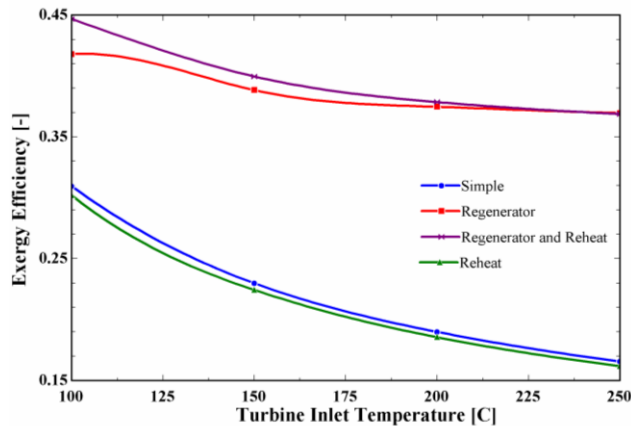


Figure 10. Effect of turbine inlet temperature on exergy efficiency

The effect of turbine inlet temperature on energy efficiency is depicted in Figure 11. As the turbine input temperature raised, both the energy efficiency and energy efficiency improved. As the turbine input pressure increased from 8000 kPa to 13000 kPa, the energy efficiency of the tCO<sub>2</sub>-RC with regenerator and reheat, which has the maximum energy efficiency,

improved from 23% to 51%. The highest increment in exergy efficiency with the rise of the high-pressure value was in the tCO<sub>2</sub>-RC with reheat.

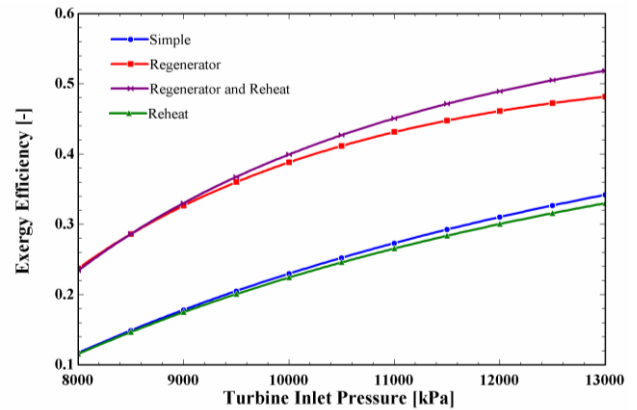


Figure 11. Effect of turbine inlet pressure on exergy efficiency

In Figure 12, the alteration in exergy efficiency with regard to the pump outlet pressure was given. Like the energy efficiency, the exergy efficiency of all tCO<sub>2</sub>-RCs decreased as the network produced from the cycle would reduce with the rise of the pump input pressure. When the pump input pressure increased from 4500 kPa to 7000 kPa, the highest diminish of 48% occurred in the simple tCO<sub>2</sub>-RC, and the lowest decrease of 31% take placed occurred in the tCO<sub>2</sub>-RC with the regenerator.

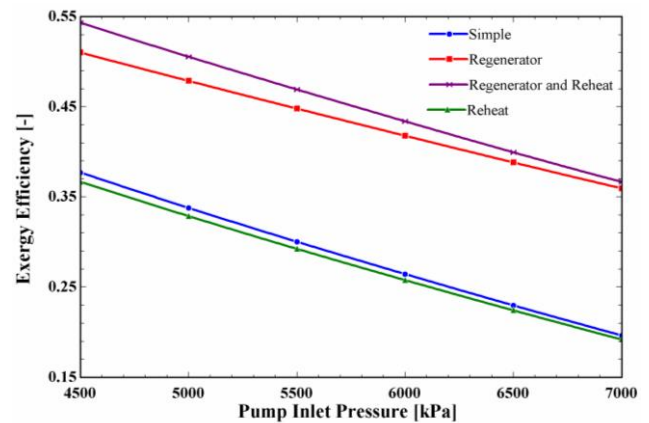


Figure 12. Effect of pump inlet pressure on exergy efficiency

## 6. Conclusions

Dynamic analysis of evacuated U-tube solar collector was made using Isparta meteorological data in this study. The CO<sub>2</sub> heated in the solar collector was directly used in four different tCO<sub>2</sub>-RCs. The thermodynamic analysis of four various tCO<sub>2</sub>-RCs with solar collectors was examined and the performances of the cycles were compared. The performance of the cycles was evaluated

by considering the parameters affecting the operation of the system. Based on the analysis conducted, the following significant conclusions are drawn:

- Under the accepted design parameters, the highest energy efficiency was calculated in the tCO<sub>2</sub>-RC with regenerator and reheat by 11.8 %, and the lowest energy efficiency was found in the tCO<sub>2</sub>-RC with reheat by 6.6%.
- As the input temperature of turbine increased, the thermal efficiency of all tCO<sub>2</sub>-RCs raised, while the exergy efficiency tended to decrease.
- All tCO<sub>2</sub>-RCs' energy and exergy efficiencies raised when the turbine's input pressure increased from 8000 kPa to 13000 kPa. The tCO<sub>2</sub>-RC with regenerator and reheat has the highest energy and exergy efficiency, and the tCO<sub>2</sub>-RC with reheat has the lowest energy and exergy efficiency.
- The pump input pressure is one of the variables affecting the system's performance. As the pump's input pressure increased, all of the tCO<sub>2</sub>-RCs' energy and exergy efficiency decreased. The highest diminish in energy efficiency is in the tCO<sub>2</sub>-RC with reheat by 50%, and the greatest decrease in exergy efficiency is in the simple tCO<sub>2</sub>-RC by 48%.
- High efficiency has been achieved by using the CO<sub>2</sub> heated in the evacuated U-tube solar collector directly in the tCO<sub>2</sub>-RCs.
- It is thought that tCO<sub>2</sub>-RCs should be used easily in solar energy applications, particularly in low and moderate-temperature practices.

## References

- [1] Forman C, Muritala IK., Pardemann R, Meyer B. Estimating the Global Waste Heat Potential. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57, 1568-1579, 2016.
- [2] Qin J, Hu E, Li X. Solar Aided Power Generation: A Review. *Energy and Built Environment*, 1, 11-26, 2020.
- [3] Li L, Ge YT, Luo X, Tassou SA. Design and Dynamic Investigation of Low-Grade Power Generation Systems with CO<sub>2</sub> Transcritical Power Cycles and R245fa Organic Rankine Cycles. *Thermal Science and Engineering Progress*, 8, 211-222, 2018.
- [4] Shu G, Shi L, Tian H, Deng S, Li X, Chang L. Configurations Selection Maps of CO<sub>2</sub>-Based Transcritical Rankine Cycle (CTRC) for Thermal Energy Management of Engine Waste Heat. *Applied Energy*, 186, 423-435, 2017.
- [5] Saleh B, Koglbauer G, Wendland M, Fischer J. Working Fluids for Low Temperature Organic Rankine Cycles. *Energy*, 32(7), 1210-1221, 2007.
- [6] Song J, Li XS, Ren XD, Gu CW. Performance Improvement of a Preheating Supercritical CO<sub>2</sub> (S-CO<sub>2</sub>) Cycle Based System for Engine Waste Heat Recovery. *Energy Conversion and Management*, 161, 225-233, 2018.
- [7] Zhang XR, Yamaguchi H, Uneno D. Experimental Study on The Performance of Solar Rankine System Using Supercritical CO<sub>2</sub>. *Renewable Energy*, 32, 2617-2628, 2007.
- [8] AlZahrani AA, Dincer I, Naterer GF. Performance Evaluation of a Geothermal Based Integrated System for Power, Hydrogen and Heat Generation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38, 14505-1451, 2013.
- [9] Bamisile O, Mukhtar M, Yimen N, Huang Q, Olotu O, Adebayo V, Dagabsi M. Comparative Performance Analysis of Solar Powered Supercritical-Transcritical CO<sub>2</sub> Based Systems for Hydrogen Production and Multigeneration. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46, 26272-26288, 2021.
- [10] Cayer E, Galanis N, Desilets M, Nesreddine H, Roy P. Analysis of a Carbon Dioxide Transcritical Power Cycle Using a Low Temperature Source. *Applied Energy*, 86, 1055-1063, 2009.
- [11] Pan L, Li B, Wei X, Li T. Experimental Investigation on the CO<sub>2</sub> Transcritical Power Cycle. *Energy*, 95, 247-254, 2016.
- [12] Shu G, Shi L, Tian H, Li X, Huang G, Chang L. An improved CO<sub>2</sub>-Based Transcritical Rankine Cycle (CTRC) Used for Engine Waste Heat Recovery. *Applied Energy*, 176, 171-182, 2016.
- [13] Yamaguchi H, Yamasaki H, Kizilkan O. Experimental investigation of Solar - Assisted Transcritical CO<sub>2</sub> Rankine Cycle for Summer and Winter Conditions from Exergetic Point of View. *International Journal of Energy Research*, 44, 1089-1102, 2020.
- [14] Sarmiento C, Cardemil JM, Díaz AJ, Barraza R. Parametrized Analysis of a Carbon Dioxide Transcritical Rankine Cycle Driven by Solar Energy. *Applied Thermal Engineering*, 140, 580 - 592, 2018.
- [15] AlZahrani AA, Dincer I. Thermodynamic Analysis of an Integrated Transcritical Carbon Dioxide Power Cycle for Concentrated Solar Power Systems. *Solar Energy*, 170, 557-567, 2018.
- [16] Kizilkan O, Khanmohammadi S, Yamaguchi H. Two-objective Optimization of a Transcritical Carbon Dioxide-Based Rankine Cycle Integrated with Evacuated Tube Solar Collector for Power and Heat Generation. *Applied Thermal Engineering*, 182, 116079, 2021.
- [17] Liang W, Yu Z, Bai S, Li G, Wang D. Study on a Near-zero Emission SOFC-based Multi-Generation System Combined with Organic Rankine Cycle and Transcritical CO<sub>2</sub> Cycle for LNG Cold Energy Recovery. *Energy Conversion and Management*, 253, 115188, 2022.

[18] Akbari N. Introducing And 3E (Energy, Exergy, Economic) Analysis of an Integrated Transcritical CO<sub>2</sub> Rankine Cycle, Stirling Power Cycle and LNG Regasification Process. *Applied Thermal Engineering*, 140, 442-454, 2018.

[19] Naseri A, Bidi M, Ahmadi MH. Thermodynamic and Exergy Analysis of a Hydrogen and Permeate Water Production Process by a Solar - Driven Transcritical CO<sub>2</sub> Power Cycle with Liquefied Natural Gas Heat Sink. *Renewable Energy*, 113,1215 - 1228, 2017.

[20] Meng F, Wang E, Zhang B, Zhang F, Zhao C. Thermo-economic Analysis of Transcritical CO<sub>2</sub> Power Cycle and Comparison with Kalina Cycle and ORC for a Low-Temperature Heat Source. *Energy Conversion and Management*, 195, 1295-1308, 2019.

[21] Shi L, Shu G, Tian H, Huang G, Chen T, Li X, Li D. Experimental Comparison Between Four CO<sub>2</sub>-Based Transcritical Rankine Cycle (CTRC) Systems for Engine Waste Heat Recovery. *Energy Conversion and Management*, 150, 159-171, 2017.

[22] Padilla RV, Soo Too YC, Benito R, Stein W. Exergetic Analysis of Supercritical CO<sub>2</sub> Brayton Cycles Integrated with Solar Central Receivers. *Applied Energy*, 148, 348-365, 2015.

[23] Conboy T, Wright S, Pasch J, Fleming D, Rochau G, Fuller R. Performance Characteristics of an Operating Supercritical CO<sub>2</sub> Brayton Cycle. *Journal Engineering Gas Turbines and Power*, 134, 111703, 2012.

[24] Klein, SA. Engineering Equation Solver (EES). F-Chart, 2022.

[25] Kalogirou SA. *Solar Energy Engineering: Processes and Systems*. 2nd Edition. Elsevier, 2013.

[26] Celik Toker S, Kizilkan O, Yamaguchi H. Transient thermal modelling of evacuated u-tube solar collectors: a case study for carbon-dioxide. *19 th International Conference on Sustainable Energy Technologies (SET-2022)*, Istanbul, August 16-18, 2022.

[27] Cengel YA, Boles MA. *Thermodynamics: An Engineering Approach*. 8th Edition. 2015.

[28] Dincer I, Rosen MA. *Exergy: Energy, Environment and Sustainable Development*. 2013.

g	gravitational acceleration
z	altitude
$\dot{Q}$	heat transfer rate
$\dot{W}$	power transfer rate
s	entropy
$e_{x,flow}$	current exergy
$\dot{S}_{gen}$	entropy generation
$\dot{E}_{x,dest}$	exergy destruction
$\eta$	efficiency

## Nomenclature

$F_R$	collector heat removal factor
S	solar radiation
$A_{ap}$	aperture area
$A_r$	receiver area
$U_L$	overall heat loss coefficient
T	temperature
$\dot{m}$	mass flow rate
h	enthalpy
v	speed