

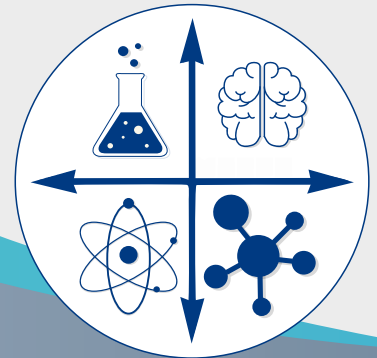


Cilt/Volume: 03 Sayı/Number: 01 Yıl/Year: 2021 E-ISSN: 2667-7989

NECMETTİN ERBAKAN ÜNİVERSİTESİ
**FEN ve MÜHENDİSLİK
BİLİMLERİ DERGİSİ**

Necmettin Erbakan University
Journal of Science and
Engineering

dergipark.gov.tr/neufmbd



NECMETTİN ERBAKAN ÜNİVERSİTESİ FEN VE MÜHENDİSLİK BİLİMLERİ DERGİSİ
NECMETTİN ERBAKAN UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE AND ENGINEERING

Cilt/Volume: 3, Sayı/Issue: 1, (Haziran/June, 2021)
Ulusal Hakemli Dergi/National Referred Journal

Sahibi/Owner

Necmettin Erbakan Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü Adına/
On Behalf of Necmettin Erbakan University Graduate School of Natural and Applied Science
Prof. Dr. İbrahim KALAYCI

Baş Editör/Editor-in-Chief

Doç. Dr. Sedat PAK

Yardımcı Editör/Associate Editor

Dr. Öğr. Üyesi Fatih ERCİ (*Asst. Prof., Ph.D.*)

Sayı Editörleri/Issue Editors

Dr. Öğr. Üyesi Fatih ERCİ (*Asst. Prof., Ph.D.*)
Arş. Gör. Behiç Selman ERDOĞDU (*Res. Asst.*)
Arş. Gör. Canan SEVİNÇ (*Res. Asst.*)

Yayın Türü/Publication Type

Yerel Süreli Yayın/Local Periodical

Yazışma Adresi/Correspondence Address

Necmettin Erbakan Üniversitesi/Ahmet Keleşoğlu Yerleşkesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, A3 Blok, 42090, Meram, KONYA

Telefon/Phone: +90 (332) 323 8220

web: www.dergipark.gov.tr/neufmbd

e-posta/e-mail: neufmbd@erbakan.edu.tr

Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, yılda iki kez yayınlanan ulusal hakemli bir dergidir.
Necmettin Erbakan University Journal of Science and Engineering is a national bi-annual journal.

E-ISSN: 2667-7989

İÇİNDEKİLER/CONTENTS

Tek Kanallı Durağan Hal Görsel Uyandırılmış Potansiyel Temelli Beyin-Bilgisayar Arayüzü İçin Deneğe Özgü Sinüzoid Yaklaşımı <i>Subject-Specific Sinusoid Approach for A Brain-Computer Interface Based on Single-Channel Steady-State Visual Evoked Potential</i>	Araştırma Makalesi <i>Research Article</i>	1-12
Sözer, Abdullah Talha.		
ORÇ ile Düşük Sıcaklıklı Isı Kaynaklarından Elektrik Üretilmesinde Islak ve Yeni Nesil Akışkanların Çevresel ve Termodinamik Performanslarının Karşılaştırılması <i>Comparison of Environmental and Thermodynamic Performance of Wet and New-Generation Fluids for Electricity Generation from Low Temperature Heat Sources with ORC</i>	Araştırma Makalesi <i>Research Article</i>	13-23
Ata, Sadık; Boyacıoğlu, Muhammed Emin; Şahin, Remzi; Kahraman, Ali.		

YAYIN KURULU/EDITORIAL BOARD

Prof. Dr. İbrahim KALAYCI
Prof. Dr. Süleyman Savaş DURDURAN
Prof. Dr. Ümmügülsüm DAĞLIOĞLU
Prof. Dr. Senar AYDIN
Prof. Dr. Sabri ALPAYDIN
Prof. Dr. Mesut UYANER
Prof. Dr. Mehmet AKTAN
Prof. Dr. Mehmet Akif ERİŞMİŞ
Prof. Dr. Hidayet OĞUZ
Prof. Dr. Haluk BİNGÖL
Prof. Dr. Aşır GENÇ
Prof. Dr. Ali KAHRAMAN
Prof. Dr. Ahmet AVCI
Doç. Dr. Sedat PAK
Doç. Dr. Hüseyin Zahit SELVİ
Doç. Dr. Nilgün ERTAŞ
Doç. Dr. Mustafa YÖNTEM
Doç. Dr. Mehmet HACIBEYOĞLU
Doç. Dr. İlhan İLHAN
Doç. Dr. Hasan KOTAN
Doç. Dr. Esra YILDIZ
Doç. Dr. Ceyda ÖZFİDAN KONAKÇI
Doç. Dr. Ahmet CAN
Dr. Öğr. Üyesi Fatih ERCİ
Dr. Öğr. Üyesi Özgür DÜNDAR
Dr. Öğr. Üyesi Hasan Ali AKYÜREK

DANIŞMA KURULU/ADVISORY BOARD

Prof. Dr. Adem ACIR	Gazi Üniversitesi/ <i>Gazi University</i>
Prof. Dr. Ahmet TÜRK	Celal Bayar Üniversitesi/ <i>Celal Bayar University</i>
Prof. Dr. Ali UZUN	Sakarya Üniversitesi/ <i>Sakarya University</i>
Prof. Dr. Ayhan İSTANBULLU	Balıkesir Üniversitesi/ <i>Balıkesir University</i>
Prof. Dr. Doğan Uğur ŞANLI	Yıldız Teknik Üniversitesi/ <i>Yıldız Technical University</i>
Prof. Dr. Elçin YUSUFOĞLU	Uşak Üniversitesi/ <i>Uşak University</i>
Prof. Dr. Erdal ULUALAN	Dumlupınar Üniversitesi/ <i>Dumlupınar University</i>
Prof. Dr. Hatem AKBULUT	Sakarya Üniversitesi/ <i>Sakarya University</i>
Prof. Dr. Hayri DAYIOĞLU	Dumlupınar Üniversitesi/ <i>Dumlupınar University</i>
Prof. Dr. Hüseyin KURT	Necmettin Erbakan Üniversitesi/ <i>Necmettin Erbakan University</i>
Prof. Dr. İlker AKÇA	Eskişehir Osman Gazi Üniversitesi/ <i>Eskisehir Osman Gazi University</i>
Prof. Dr. Mehmet KARALI	Necmettin Erbakan Üniversitesi/ <i>Necmettin Erbakan University</i>
Prof. Dr. Metin BÜLBÜL	Dumlupınar Üniversitesi/ <i>Dumlupınar University</i>
Prof. Dr. Nebiye MUSAOĞLU	İstanbul Teknik Üniversitesi/ <i>Istanbul Technical University</i>
Prof. Dr. Oğuz GÜRSOY	Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi/ <i>Mehmet Akif Ersoy University</i>
Prof. Dr. Rahmi ÜNAL	Gazi Üniversitesi/ <i>Gazi University</i>
Prof. Dr. Ramazan KÖSE	Dumlupınar Üniversitesi/ <i>Dumlupınar University</i>
Prof. Dr. Recep ARTIR	Marmara Üniversitesi/ <i>Marmara University</i>
Prof. Dr. Sabri KOÇER	Necmettin Erbakan Üniversitesi/ <i>Necmettin Erbakan University</i>
Prof. Dr. Salih Zeki YILDIZ	Sakarya Üniversitesi/ <i>Sakarya University</i>
Prof. Dr. Süleyman KALELİ	Sakarya Üniversitesi/ <i>Sakarya University</i>
Prof. Dr. Hidayet OĞUZ	Necmettin Erbakan Üniversitesi/ <i>Necmettin Erbakan University</i>
Prof. Dr. Cüneyt Nadir SOLAK	Dumlupınar Üniversitesi/ <i>Dumlupınar University</i>
Prof. Dr. Hüseyin AKSOY	Sakarya Üniversitesi/ <i>Sakarya University</i>
Prof. Dr. Mehmet Akif ERİŞMİŞ	Necmettin Erbakan Üniversitesi/ <i>Necmettin Erbakan University</i>
Doç. Dr. Ahmet Turgut BİLGİÇLİ	Sakarya Üniversitesi/ <i>Sakarya University</i>
Doç. Dr. Fatih TÖRNÜK	Yıldız Teknik Üniversitesi/ <i>Yıldız Technical University</i>
Doç. Dr. Hakan TONGAL	Süleyman Demirel Üniversitesi/ <i>Suleyman Demirel University</i>
Doç. Dr. Halef DİZLEK	Osmaniye Korkut Atay Üniversitesi/ <i>Osmaniye Korkut Atay University</i>
Doç. Dr. Mustafa Kürşat DEMİR	Necmettin Erbakan Üniversitesi/ <i>Necmettin Erbakan University</i>
Doç. Dr. Yakup ŞENYÜZ	Dumlupınar Üniversitesi/ <i>Dumlupınar University</i>
Dr. Öğr. Üyesi Fatih TOKSOY	İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü/ <i>Izmir Institute of Technology</i>
Dr. Öğr. Üyesi Hasan Ali AKYÜREK	Necmettin Erbakan Üniversitesi/ <i>Necmettin Erbakan University</i>

Tek Kanallı Durağan Hal Görsel Uyandırılmış Potansiyel Temelli Beyin-Bilgisayar Arayüzü İçin Deneğe Özgü Sinüzoid Yaklaşımı

Abdullah Talha SÖZER¹ 

¹ Karabük University, Faculty of Engineering, Department of Electrical and Electronics Engineering, Karabük, Turkey, talhasozer@karabuk.edu.tr (*Sorumlu Yazar/ Corresponding Author*)

Makale Bilgileri

ÖZ

Makale Geçmişi

Geliş: 17.12.2020

Kabul: 24.06.2021

Yayın: 30.06.2021

Anahtar Kelimeler:

Beyin Bilgisayar Arayüzü
Durağan Hal Görsel Uyandırılmış Potansiyel Tek Kanal Tespit Deneğe Özgü Sinüzoid

Beyin-bilgisayar arayüzünün (BBA) amacı, ciddi engelli bireylerin günlük yaşamlarını desteklemektir. Pratik BBA için en önemli faktörlerden biri olan kullanım kolaylığı, az sayıda elektrot kullanıldığında artmaktadır. Ancak az sayıda elektrot kullanılması BBA performansını olumsuz yönde etkiler. Bu çalışmada, tek kanallı durağan hal görsel uyandırılmış potansiyel (DHGUP) temelli BBA'nın performansını artırmak ve böylece kullanım kolaylığını desteklemek için, deneğe özgü sinüzoid yaklaşımı (DÖSY) ile yeni bir tek kanallı DHGUP algılama yöntemi geliştirilmiştir. DÖSY'de deneğe özgü sinüzoidler, eğitim aşamasında DHGUP'nin frekans ve faz özelliklerinden faydalanılarak tanımlanmıştır. Tanımlanan bu sinüzoidler, test aşamasında, DHGUP yanıtının tespitinde referans olarak kullanılmıştır. Geliştirilen yöntemin tespit performansı, bir kıyaslama veri setinde, iyi bilinen güç spektral yoğunluk analizi (GSYA), minimum mutlak büzülme ve seçim operatörü (MMBSO) ve gelişmiş kanonik korelasyon analizi (KKA) yöntemleri ile karşılaştırılarak test edilmiştir. Deneysel sonuçlar, DÖSY yöntemiyle, GSYA, MMBSO ve gelişmiş KKA yöntemlerine kıyasla önemli ölçüde daha yüksek tespit doğruluğu ve bilgi aktarım hızı (BAH) göstermiştir. Ve deneğe özgü sinüzoidlerin gelişmiş KKA'da kullanılan şablon sinyallerden daha iyi DHGUP yanıtını temsil ettiği gösterilmiştir. Ek olarak önerilen yöntem, tek kanallı DHGUP tabanlı BBA için maksimum 125 ve ortalama 81 bit / dak BAH ile, bildirilen en yüksek BAH değerlerinden birine ulaşmıştır.

Subject-Specific Sinusoid Approach for A Brain-Computer Interface Based on Single-Channel Steady-State Visual Evoked Potential

Article Info

ABSTRACT

Article History

Received: 17.12.2020

Accepted: 24.06.2021

Published: 30.06.2021

Keywords:

Brain Computer Interface
Steady-State Visual Evoked Potential
Single Channel Detection
Subject-Specific Sinusoid

The aim of brain-computer interface (BCI) is to support the daily life of individuals with severe disabilities. For practical BCI, ease of use is one of the most important factors, which is enhanced when fewer electrodes are used. However, using fewer electrodes affect the performance of BCI negatively. In this study, a novel single-channel steady-state visual evoked potential (SSVEP) detection method with subject-specific sinusoids approach (SSSA) was developed to enhance the performance of single channel SSVEP based BCI, therefore, to assist the ease of use. For the SSSA, subject-specific sinusoids were defined from training data based on SSVEP frequency and phase features. To detect the SSVEP response, defined sinusoids were used as reference. To evaluate the detection performance of the developed method, it was compared with the well-known power spectral density analysis (PSDA), least absolute shrinkage and selection operator (LASSO) and advanced canonical correlation analysis (CCA) methods on a benchmark dataset. The experimental results showed significantly greater detection accuracy and information transfer rate (ITR) with the SSSA method compared to the PSDA, LASSO and advanced CCA methods. And it is worth to noting that subject-specific sinusoids better represent SSVEP response than template signals that used in advanced CCA. Also proposed method reached one of the highest ITRs reported with max 125 and average 81 bits/min ITRs for single-channel SSVEP based BCI.

Atıf/Citation: Sözer, AT. (2021). Subject-specific sinusoid approach for a brain-computer interface based on single-channel steady-state visual evoked potential (*Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 3(1), 1-12.



"This article is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) (CC BY-NC 4.0)"

INTRODUCTION

The brain–computer interface (BCI) is an alternative communication channel which interprets the user’s intention and produces an output command, independent of nerves and muscles, to control external devices such as a speller [1] or wheelchair [2]. The main goal of BCI is to support the daily life of individuals with severe disabilities. There are already numerous BCI studies reported in the literature focusing on patients with locked-in syndrome (LIS) [3]. Lately, BCI studies focusing on patients with completely locked-in syndrome (CLIS) have started to appear in the literature as well [4,5].

In EEG-based BCIs, steady-state visual evoked potential (SSVEP) response is often preferred to determine the user's intent. Because it provides a high information transfer rate (ITR) and requires short/no training time. Current SSVEP-based BCI studies are most often executed under laboratory conditions with healthy individuals [6]. Furthermore, the experiments are led by experts with high-level measurement devices. However, as real-life conditions differ from those of a laboratory, some important factors summarised below must be considered when developing a SSVEP-based BCI which is suitable for real life.

SSVEP-based BCIs have been investigated for about two decades, however, disabled patients have rarely been included in studies [6,7]. Clinical SSVEP studies should be extended to real-life SSVEP-based BCI, and the long-term feasibility of the SSVEP paradigm must be investigated. In real life, BCI must meet the needs of its users. It must interpret the user’s intention quickly and reliably, and it must be robust. In this way, the user can partially regain their lost functions. A very robust SSVEP detection method was recently developed [8]; however, it must be tested in disabled people under real-life conditions. Ease of use is another important factor for patients and caregivers. Most SSVEP detection methods use multiple EEG electrodes, which negatively affect ease of use. Furthermore, the difficult and time-consuming set-up procedure can be overcome by using a small number of dry electrodes. Finally, the system should be affordable.

This work is focused on single-channel SSVEP detection method to assist the ease of use and cost. Single-channel SSVEP detection was realized largely by PSDA methods [9–13]. As the frequency of the SSVEP response is the same as the flickering frequency and harmonics of a focused stimulus, the simplest solution for detecting a target stimulus in single-channel SSVEP detection is frequency domain analysis. But it has a drawback. The number of possible selections is an important parameter for BCI. With a greater number, more useful BCIs can be designed. The use of stimuli with different frequencies increases the number of possible selections in SSVEP-based BCI. But the use of more stimuli leads to a smaller frequency step, and the frequencies used at these stimuli become closer together. As the EEG epochs shorten, the resolution of the frequency decreases. Furthermore, when more stimuli are used, target stimulus detection becomes more difficult. In this case, PSDA method were deemed not suitable for SSVEP detection of short EEG signals [14]. Another method to access frequency feature of SSVEP response is canonical correlation analysis (CCA) [13,15,16]. Besides system that exploits time-domain based method was also reported [17]. Also, the combination of standard CCA and individual template based CCA (IT-CCA), which gave the highest ITR for multichannel SSVEP based BCI [18,19], was used for single-channel SSVEP detection. Thanks to this combinatorial method, the frequency and time features of SSVEP could be exploited [20]. However, detection accuracy of SSVEP based BCI systems that use single channel is lower than those that use multiple channels. To achieve robust SSVEP based BCI systems single-channel SSVEP detection methods that provide higher ITR must be developed.

In this study, we developed a novel single-channel SSVEP detection method, named the subject-specific sinusoid approach (SSSA), to increase the ITR of single channel SSVEP based BCI, therefore, to help the ease of use of it. With this method, subject-specific reference sinusoids are defined, taking advantage of the frequency and time-locked features of SSVEP. As a result, the references reflect an individual’s SSVEP response. Target

stimulus detection was performed using these references. Using subject-specific sinusoids instead of sinusoids at zero phase allowed us to apply the frequency and phase feature of the stimulus. In addition, we compared the SSSA method with traditional power spectral density analysis (PSDA), least absolute shrinkage and selection operator (LASSO) and CCA & IT-CCA methods, which were preferred to single-channel SSVEP detection [9–12,20,21], using a benchmark dataset. Very high detection accuracy and ITR were provided by the proposed method when compared with the other methods for all time windows. And obtained coefficients of variation showed that it also provided more consistent detection accuracy with regard to inter-subject differences. Thus, the proposed method can contribute the ease of use of BCI.

The rest of the paper is organised as follows: section 2 explains the proposed method, the dataset and data analysis; section 3 presents the experimental results; section 4 discusses the findings, and section 5 concludes the study.

MATERIAL AND METHODS

Subject-Specific Sinusoid Approach

In addition to its frequency characteristics, the SSVEP response is time-locked to the onset of the stimulus. About 80–160 milliseconds after stimulus onset, the SSVEP response arises [22]. This delay varies with age, stimulus frequency and number of harmonics [23]. The time difference between the stimulus onset and the response signal is called the SSVEP phase (Figure 1). The SSVEP phases of an individual at different stimulus frequencies can be determined, from which sinusoids that represent the individual's SSVEP response can be defined. These subject-specific sinusoids can be used as reference for target detection [24].

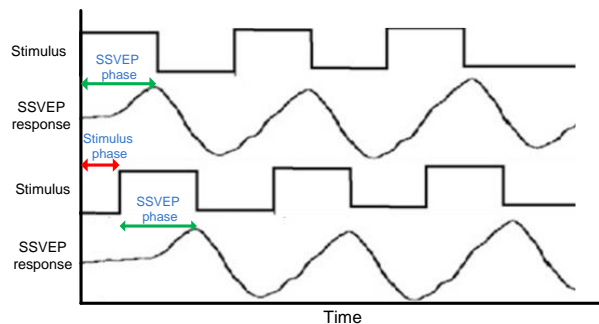


Figure 1. Visual stimulus onset and steady-state visual evoked potential (SSVEP) response

As mentioned below steps and shown in the flow diagram of the SSSA method, illustrated in Figure 2, subject-specific reference sinusoids were defined during the training stage.

Step 1 (Filtering): EEG signals were filtered by band-pass filters. To calculate SSVEP phases belong to each harmonic, cut-off frequencies of FIR band-pass filters are selected as 8-16 Hz, 16-32 Hz and 24-48 Hz.

Step 2 (Averaging): The filtered signal is averaged.

Step 3 (Optimization): The phase is determined in order to maximise the correlation between average EEG and f_i Hz sinusoid by equation 1:

$$\theta_{ih} = \operatorname{argmax}_{\theta} [\operatorname{cor}(S'_{mean}, \cos(2\pi f_i n \times h + \theta))], \quad i = 1, 2 \dots K \quad (1)$$

where S'_{mean} is the averaged EEG, f_i is the stimulus frequency, h is the number of harmonics, K is the stimulus number and θ_{ih} indicates the optimal phase. θ was calculated by $\tan^{-1}(-b/a)$ where

$$a = (S'_{mean})^T \times \cos(2\pi f_i n \times h) \text{ and } b = (S'_{mean})^T \times \sin(2\pi f_i n \times h).$$

Using these phases, subject-specific reference sinusoids are defined according to equation 2:

$$\begin{aligned} r_{f_{i1}} &= \cos(2\pi f_i n \times 1 + \theta_{i1}) \\ r_{f_{i2}} &= \cos(2\pi f_i n \times 2 + \theta_{i2}) \\ &\vdots \\ r_{f_{ih}} &= \cos(2\pi f_i n \times h + \theta_{ih}) \end{aligned} \tag{2}$$

At the test stage, the references were used for target stimulus detection. To detect the target, total correlation values between filtered signals and subject-specific sinusoids were compared using equation 3:

$$f_t = \max_{f_i} \rho_i, \quad i = 1, 2, \dots, K \tag{3}$$

where ρ_i is the total correlation value at f_i frequency and K is the stimulus number.

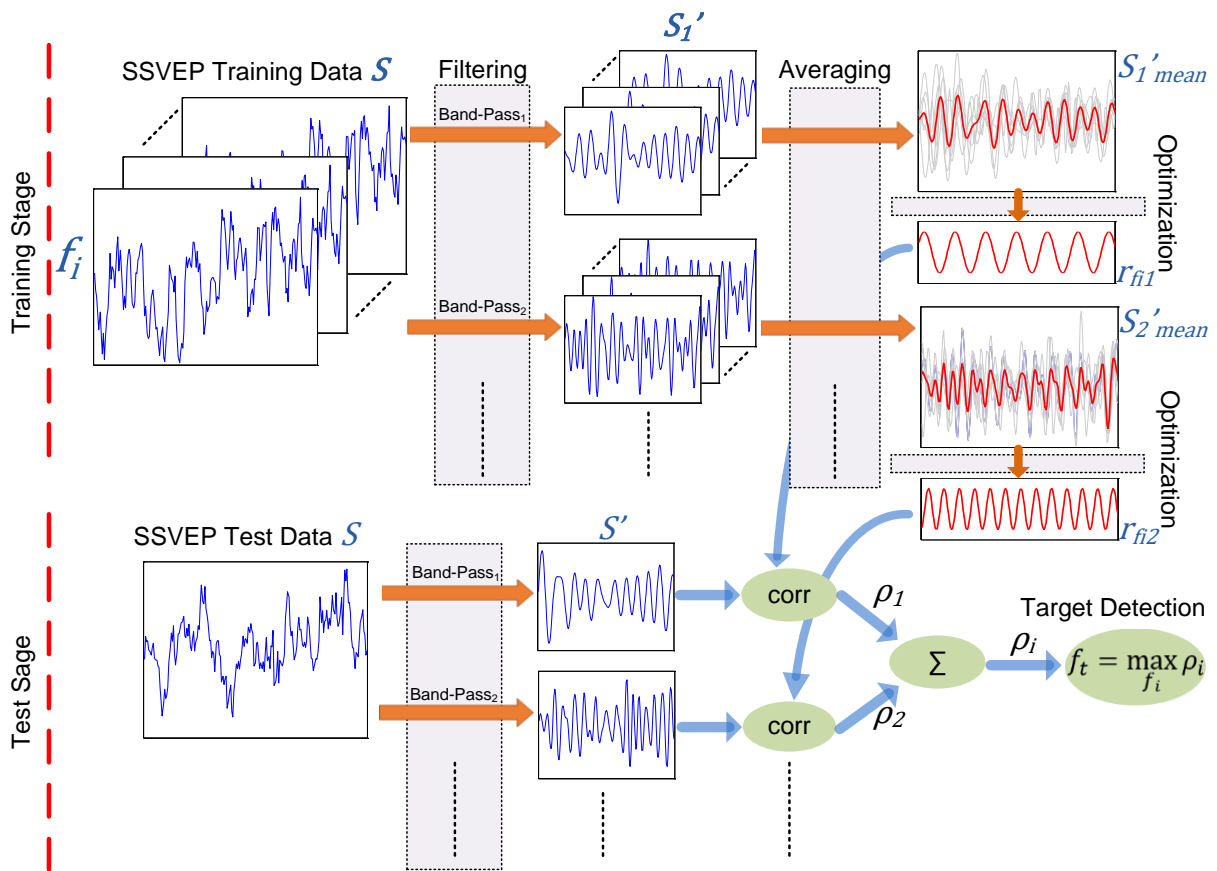


Figure 2. Flow diagram of the proposed method

Comparison Methods

Power spectral density analysis is a common and basic method for SSVEP detection. The SSVEP components can be detected by examining the EEG spectrum. In this method, PSD values that correspond to stimuli frequencies are found. The frequency with the maximal PSD value is accepted as the target frequency, determined by equation 4:

$$f_t = \max_{f_i} P_i, \quad i = 1, 2, \dots, K \quad (4)$$

where P_i is the PSD value at f_i frequency and K is stimulus number.

Although LASSO-based SSVEP detection was developed for multiple-channel systems [25], it has been used successfully in single-channel SSVEP-based BCI [21]. The EEG epoch y is defined as a linear regression model in the LASSO method, calculated by equation 5:

$$y = X\beta + \varepsilon \quad (5)$$

where ε is the noise vector, β is the contribution coefficient vector and X is the sine and cosine functions at each stimulus frequency and harmonic. With LASSO estimation, the contribution of each of the functions to the EEG epoch can be determined. For target detection, coefficient vectors are found, and the absolute values of components of the coefficient vector are summed for each stimuli frequency. The frequency at which the highest total value is obtained is considered the target frequency. A detailed explanation of LASSO can be found elsewhere [21,25,26].

CCA, that is used detection of target frequency by searching correlation between reference sinusoids and EEG signals, is a very popular statistical method. CCA-based SSVEP detection was developed for multiple-channel BCI [27] but also it was applied successfully to detect target stimulus in single-channel SSVEP-based BCI [13,15,16]. Since CCA-based SSVEP detection was a revolutionary method, some upgraded versions were developed to advance its detection performance. One of them is combination of CCA & IT-CCA method [19]. It utilizes standard CCA and templates EEG signal of subjects and it offered the highest ITR for SSVEP based BCI [18]. In this method, that also was used for single-channel SSVEP detection [20], the total correlation value between EEG signals and standard reference sinusoids and individual template signals are used to detect target stimulus. A detailed explanation of CCA & IT-CCA can be found in [19].

Dataset

The developed method was evaluated using a benchmark dataset [28]. A Synamps2 EEG system with 64 channels was used to collect EEG data from 35 healthy individuals. The EEG signals sampled at 1000 samples/s were down-sampled to 250 samples/s to reduce computation and storage costs. Only a 50-Hz notch filter was applied to raw data.

The SSVEP-based BCI experiments were executed with 40 repetitive visual stimuli. The stimuli were rendered on a 23.6-inch LCD monitor with a 60 Hz refresh rate. To obtain a unique stimulus property, different combinations of frequencies and phases were used. Forty different frequency values between 8 and 15.8 Hz in steps of 0.2 Hz were used, together with four different phase values between 0 and 1.5π with steps of 0.5π . The flicker sequence was obtained according to equation 6:

$$s(f, \phi, i) = \frac{1}{2} \left\{ 1 + \sin \left[2\pi f \left(\frac{i}{\text{refreshrate}} \right) + \phi \right] \right\} \quad (6)$$

where f is the flicker frequency, ϕ is the flicker phase and i indicates the frame index of the sequence.

The experiments consisted of six sessions, each of which contained 40 trials that lasted for 6 s. At the onset of the trial, a cue was presented for 0.5 s to guide the subject to the target stimulus. Afterwards, all stimuli flickered for 5 s. At the end of each trial, a blank screen was displayed for 0.5 s. Subjects were allowed a few

minutes to rest between sessions.

Data Analysis

Target stimulus detection by SSSA, PSDA, LASSO and CCA & IT-CCA were performed on signals collected from Oz location. Analyses were carried out at varying epoch lengths. Because of visual latency, the first 135 ms of each data epoch was extracted. First three harmonics were used to detect target stimulus. Target visual stimulus detection accuracy were calculated and compared. Leave-one-run-out cross-validation was applied to evaluate the SSSA method. Among the six sessions conducted, five were used in training to determine references and the remaining session was considered test data.

In addition to target stimulus detection accuracy, performances of the methods were also evaluated by ITR. The ITR is defined by equation 7:

$$ITR = \frac{60}{T} \times [\log_2 N + P \log_2 P + (1 - P) \log_2 \frac{(1-P)}{(N-1)}] \quad (7)$$

where T is time window, N is the number of stimuli and P is detection accuracy between 0 and 1.

RESULTS

The SSVEP response is time-locked to the onset of the stimulus and in the proposed method it is claimed that this characteristic can be used as a distinctive feature. To prove this, a subject's SSVEP phases that corresponds to stimuli with different phase is shown in the Figure 3. In the figure, the frequencies of the stimuli are close, about 8 Hz, but there are phase differences between them. It is seen that the SSVEP phases is related to time difference between the stimulus onset, and it can be used to detect target stimulus. Also, SSVEP phases related to 8 Hz 0° stimulus for 6 session of each subject was obtained then standard deviations of each subject's phases calculated. Average of standard deviations of 35 subject's phases is 27° .

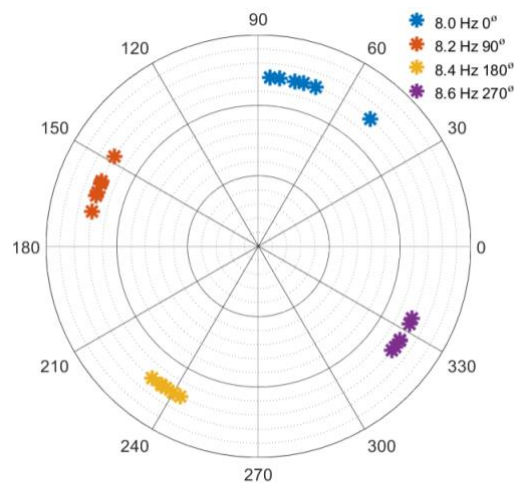


Figure 3. SSVEP phases related to 8 Hz 0° stimulus (blue), 8.2 Hz 90° stimulus (red), 8.4 Hz 180° stimulus (yellow), 8.6 Hz 270° stimulus (purple),

The accuracy and ITR of target stimulus detection using the SSSA, PSDA LASSO and CCA & IT-CCA methods are presented in the figures. Statistical analysis of the accuracy of each method is also reported. Figure 4 shows the average target detection accuracy at various time windows ranging from 1 to 4 s. The SSSA method provided higher detection accuracy when compared to the other methods for all time windows.

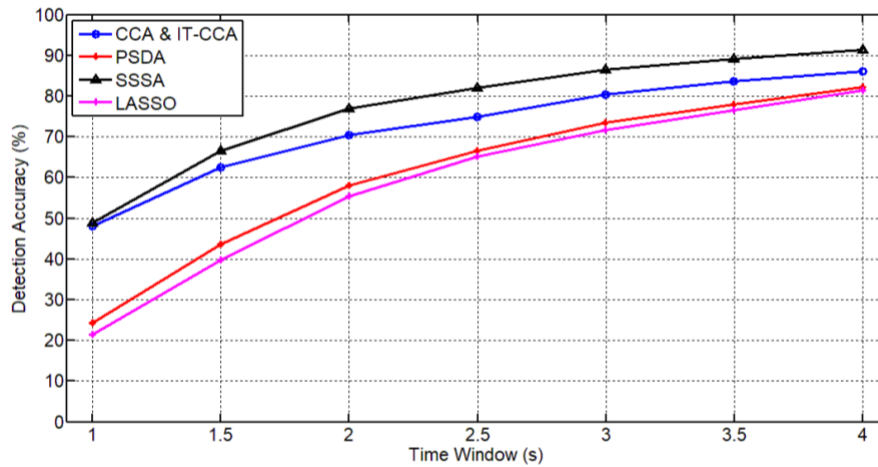


Figure 4. Average detection accuracy at various time windows

Figure 5 presents a comparison of target detection accuracies obtained for each subject using the four methods. The results were obtained from 2-s epochs. As seen in the figure, SSSA consistently outperformed PSDA and LASSO for each of the subjects and outperformed CCA & IT-CCA for most of the subjects. The average accuracy was 77.7%, 55.4%, 58.1% and 70.5%, for SSSA, LASSO, PSDA and CCA & IT-CCA, respectively. For each method, the standard deviations were 20.3, 22.8, 23.5 and 24 and coefficients of variation were 0.26, 0.41 0.41 and 0.34 for SSSA, LASSO, PSDA and CCA & IT-CCA, respectively.

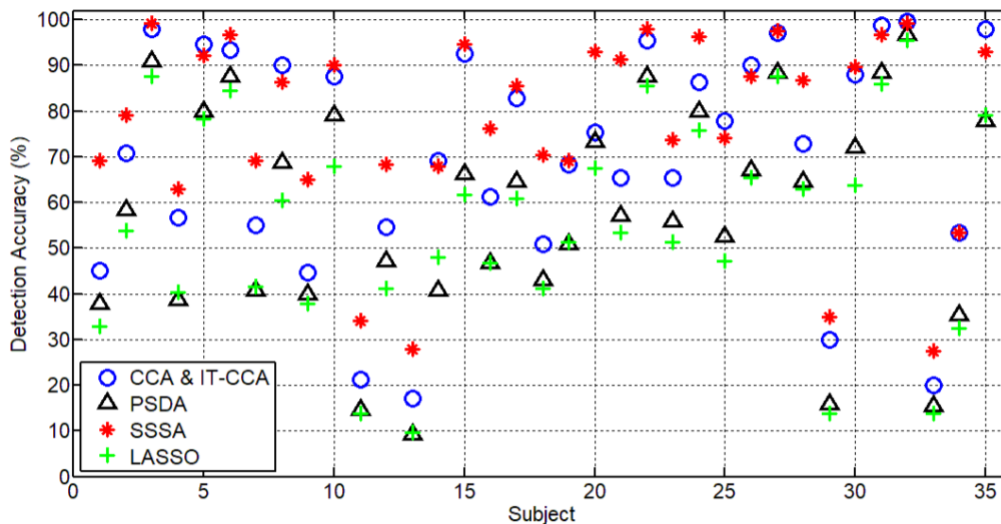


Figure 5. Target detection accuracy for all subjects at 2-s epochs

Statistical analysis was performed to compare the proposed method to the LASSO and PSDA methods. Paired-sample t-tests (SSSA vs. LASSO, SSSA vs. PSDA and SSSA vs. CCA & IT-CCA) were used to evaluate differences in detection accuracy. All of the results were highly significant ($p < 0.0001$), confirming that the proposed method allowed better SSVEP detection.

Figure 6 depicts the ITR obtained from the average accuracy at various time windows. As shown in the figure, the proposed method provided a much better ITR than the other methods. The highest ITR of 81 bits/min was obtained at 2-s EEG epochs. As there was a 0.5-s cue duration, the detection time used in the ITR formula for the 2-s EEG epoch was 2.5 s.

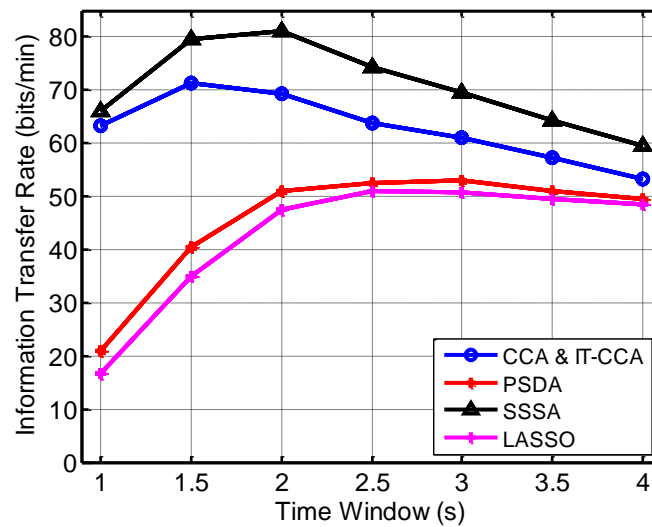


Figure 6. Average information transfer rate (ITR) for various time windows with two harmonics

Table 1 shows the ITR obtained by SSSA at 2-s EEG epochs for each subject. The highest ITR was 125 bits/min (subject 3), and the average ITR was 85.2 ± 31.8 bits/min.

DISCUSSION

When patients and caregivers are considered, an important goal for BCI is that it is easily usable by home users, which can be achieved by successful detection through fewer measurement channels. In this regard, an advantage of the SSVEP response is that the SSVEP signal can be detected from only one channel, allowing the BCI to be designed with high ITR. Based on this, we developed a method that uses both SSVEP frequency and phase in order to increase single-channel SSVEP detection accuracy. In this method, which uses the behaviour of the SSVEP response, SSVEP phases were determined. Since several factors like individual difference, stimulus frequency [23] affect the SSVEP response delay, optimal phases of each subject were calculated for each stimulus frequency and its harmonics. Then subject-specific reference sinusoids were defined using the phases. By identifying the optimal phase, the reference sinusoids better reflect an individual's SSVEP response than the commonly used sinusoids at zero phase [19,29]. These references were able to successfully detect the target stimulus frequency.

Table 1. Information transfer rate (ITR) for all subjects at 2-s epochs with two harmonics.

Subject	ITR (bits/min)	Subject	ITR (bits/min)	Subject	ITR (bits/min)	Subject	ITR (bits/min)
1	69,2	10	103,8	19	69,2	28	100,5
2	85,0	11	22,0	20	112,6	29	24,6
3	125,0	12	65,9	21	107,2	30	102,9
4	60,3	13	15,8	22	122,7	31	120,5
5	108,1	14	65,3	23	75,2	32	123,8
6	119,5	15	113,6	24	118,4	33	16,6
7	67,9	16	82,1	25	78,6	34	47,4
8	96,4	17	94,8	26	100,5	35	110,8
9	61,5	18	74,5	27	120,5	Average	85.2 ± 31.8

Taking into account that high intent detection accuracy in a short time is one of the aims of BCI, importance of SSVEP detection methods cannot be ignored. The results showed that the SSSA method increased target detection accuracy, yielding even more pronounced improvement when compared to the other methods.

Besides, much better detection accuracies for each of the subjects were obtained by the proposed method. This shows that the proposed method enabled the consistent production of subject-specific sinusoids. The standard deviations obtained by the methods were close to each other; however, as the average values of groups

were very different, the coefficient of variation was used instead of the standard deviation to compare results. The coefficient of variation for the proposed method was lower than the other methods. Therefore, the SSSA method appears to be more robust against inter-user differences.

Although LASSO could successfully detect the target stimulus [25], the results obtained by this method were at the same level as PSDA. In LASSO, also in standard CCA, target stimulus is detected by similarity between EEG signal and reference signals. Since sine and cosine functions with zero phase are generally used as reference, the methods don't use temporal features of SSVEPs [30]. Therefore, they are not phase-sensitive and don't use SSVEP phase feature like PSDA method. When a high noise at stimuli frequencies add to EEG, they decide this frequency as target stimulus frequency. Because they use only SSVEP frequency feature. In the proposed method, since reference sinusoids are determined taking SSVEP phase feature into account higher detection accuracy is obtained. The phase feature can be used with the FFT-based method [22], but the resolution in FFT-based methods is negatively affected by short epochs.

CCA & IT-CCA method uses both frequency and phase features of SSVEP response. Standard CCA method evaluates frequency feature of SSVEP response and IT-CCA method assess phase features of SSVEP response. Template signals (S'_{mean} , which is calculated in step 2) are obtained by averaging multiple trials in training stage. Because of time-locked property of SSVEP, this template allows using phase features. But the results showed that CCA & IT-CCA didn't give higher detection accuracy than SSSA method. Because S'_{mean} contains noise components in addition to the SSVEP signal. Since noise components are random, it causes decreases in the correlation values during the test stage. This case can be seen using S'_{mean} as reference signal for the proposed method instead of subject specific sinusoids r_{f_i} . When S'_{mean} was used as reference, the detection accuracy decreased as seen in the Figure 7. Therefore, subject specific sinusoids can better represent SSVEP response than template signals.

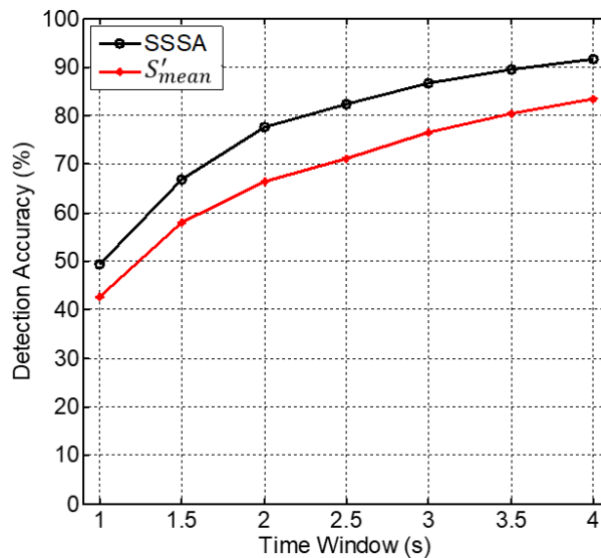


Figure 7. Average detection accuracy using S'_{mean} as reference signal

The performance of BCIs can be compared using the ITR. As the ITR is dependent on the intent detection time, accuracy and number of choices, it allows comparison between different systems. With the SSSA method we reached an ITR of 81 bits/min. These results are higher than those reported by other single-channel SSVEP-based BCI studies cited in Table 2.

Bipolar referencing is a simple and efficient method to eliminate noise components. To improve the method, optimal lead selection or a generated reference can be applied [33,34]. Also using different features that

Table 2. Some other single channel SSVEP studies.

	ITR (bits/min)	used SSVEP feature
X. Chai et al. [16]	45	Frequency feature of SSVEP by CCA
A. Bisht et al. [13]	58.3	Frequency feature of SSVEP by CCA
D. Kim et al. [20]	72	Frequency and phase features of SSVEP by CCA & IT-CCA
S. Ajami et al. [21]	67.1	Frequency feature of SSVEP by LASSO
S.-C. Chen et al. [9]	20.6	Frequency feature of SSVEP by PSDA
A. Luo et al. [17]	34.3	Time domain signal form of SSVEP
T.H. Nguyen et al. [31]	49	Frequency feature of SSVEP by PSDA
H.J. Hwang et al. [10]	40.7	Frequency feature of SSVEP by PSDA
Q. Gao et al. [32]	21	Frequency feature of SSVEP by CCA

characterize the SSVEP response may help to detect target stimulus [35]. Finally, subject-specific sinusoids can be used in multiple-channel SSVEP detection methods to facilitate the detection of a target stimulus.

CONCLUSION

In this study, a novel single-channel SSVEP detection method named SSSA was developed, which was subsequently evaluated using a benchmark dataset. Subject-specific reference sinusoids were defined in the proposed method. Due to these references, both the frequency and phase characteristics of the SSVEP response were used in target detection. The proposed method was compared with the LASSO and well-known PSDA methods, and was found to provide much better target detection accuracy and ITR. Thus, the SSSA method is suitable for single-channel SSVEP-based BCI.

ETHICAL APPROVAL

The collection of the dataset used in this study was approved by the Research Ethics Committee of Tsinghua University.

REFERENCES

- [1] E. Yin, Z. Zhou, J. Jiang, F. Chen, Y. Liu, D. Hu, A speedy hybrid BCI spelling approach combining P300 and SSVEP., *IEEE transactions on bio-medical engineering*. 61 (2014) 473–83. doi:10.1109/TBME.2013.2281976.
- [2] T. Sakurada, T. Kawase, K. Takano, T. Komatsu, K. Kansaku, A BMI-based occupational therapy assist suit: asynchronous control by SSVEP., *Frontiers in neuroscience*. 7 (2013) 172. doi:10.3389/fnins.2013.00172.
- [3] E. Pasqualotto, S. Federici, M.O. Belardinelli, Toward functioning and usable brain–computer interfaces (BCIs): A literature review, *Disability and Rehabilitation: Assistive Technology*. 7 (2012) 89–103. doi:10.3109/17483107.2011.589486.
- [4] U. Chaudhary, B. Xia, S. Silvoni, L.G. Cohen, N. Birbaumer, Brain–Computer Interface–Based Communication in the Completely Locked-In State, *PLOS Biology*. 15 (2017) e1002593. doi:10.1371/journal.pbio.1002593.
- [5] C. Guger, R. Spataro, B.Z. Allison, A. Heilinger, R. Ortner, W. Cho, V. La Bella, Complete Locked-in and Locked-in Patients: Command Following Assessment and Communication with Vibro-Tactile P300 and Motor Imagery Brain-Computer Interface Tools, *Frontiers in Neuroscience*. 11 (2017). doi:10.3389/fnins.2017.00251.
- [6] H.-J. Hwang, C.-H. Han, J.-H. Lim, Y.-W. Kim, S.-I. Choi, K.-O. An, J.-H. Lee, H.-S. Cha, S. Hyun Kim, C.-H. Im, Clinical feasibility of brain-computer interface based on steady-state visual evoked potential in patients with locked-in syndrome: Case studies, *Psychophysiology*. 54 (2017) 444–451. doi:10.1111/psyp.12793.
- [7] D. Lesenfants, D. Habbal, Z. Lugo, M. Lebeau, P. Horki, E. Amico, C. Pokorny, F. Gómez, A. Soddu, G. Müller-Putz, S. Laureys, Q. Noirhomme, An independent SSVEP-based brain-computer interface in locked-in syndrome., *Journal of neural engineering*. 11 (2014) 035002. doi:10.1088/1741-2560/11/3/035002.
- [8] N. Morikawa, T. Tanaka, M.R. Islam, Complex sparse spatial filter for decoding mixed frequency and phase coded steady-state visually evoked potentials, *Journal of Neuroscience Methods*. 304 (2018) 1–10. doi:10.1016/j.jneumeth.2018.04.001.

- [9] S.-C. Chen, Y.-J. Chen, I.A.E. Zaeni, C.-M. Wu, A Single-Channel SSVEP-Based BCI with a Fuzzy Feature Threshold Algorithm in a Maze Game, *International Journal of Fuzzy Systems*. 19 (2017) 553–565. doi:10.1007/s40815-016-0289-3.
- [10] H.J. Hwang, J.H. Lim, Y.J. Jung, H. Choi, S.W. Lee, C.H. Im, Development of an SSVEP-based BCI spelling system adopting a QWERTY-style LED keyboard, *Journal of Neuroscience Methods*. 208 (2012) 59–65. doi:10.1016/j.jneumeth.2012.04.011.
- [11] X. Gao, D. Xu, M. Cheng, S. Gao, A BCI-based environmental controller for the motion-disabled, *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*. 11 (2003) 137–140. doi:10.1109/TNSRE.2003.814449.
- [12] L. Angrisani, P. Arpaia, D. Casinelli, N. Moccaldi, A Single-Channel SSVEP-Based Instrument with Off-The-Shelf Components for Trainingless Brain-Computer Interfaces, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 68 (2019) 3616–3625. doi:10.1109/TIM.2018.2882115.
- [13] A. Bisht, S. Srivastava, G. Purushothaman, A new 360° rotating type stimuli for improved SSVEP based brain computer interface, *Biomedical Signal Processing and Control*. 57 (2020). doi:10.1016/j.bspc.2019.101778.
- [14] Y. Zhang, G. Zhou, J. Jin, M. Wang, X. Wang, A. Cichocki, L1-regularized multiway canonical correlation analysis for SSVEP-based BCI, *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*. 21 (2013) 887–896. doi:10.1109/TNSRE.2013.2279680.
- [15] C. Farmaki, M. Krana, M. Padiaditis, E. Spanakis, V. Sakkalis, Single-channel SSVEP-Based BCI for robotic car navigation in real world conditions, içinde: *Proceedings - 2019 IEEE 19th International Conference on Bioinformatics and Bioengineering, BIBE 2019*, 2019: ss. 638–643. doi:10.1109/BIBE.2019.00120.
- [16] X. Chai, Z. Zhang, K. Guan, Y. Lu, G. Liu, T. Zhang, H. Niu, A hybrid BCI-controlled smart home system combining SSVEP and EMG for individuals with paralysis, *Biomedical Signal Processing and Control*. 56 (2020). doi:10.1016/j.bspc.2019.101687.
- [17] A. Luo, T.J. Sullivan, A user-friendly SSVEP-based brain-computer interface using a time-domain classifier, *Journal of neural engineering*. 7 (2010) 26010. doi:10.1088/1741-2560/7/2/026010.
- [18] X. Chen, Y. Wang, M. Nakanishi, X. Gao, T.-P. Jung, S. Gao, High-speed spelling with a noninvasive brain-computer interface, *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 112 (2015) 1–10. doi:10.1073/pnas.1508080112.
- [19] M. Nakanishi, Y. Wang, Y.-T. Wang, T.-P. Jung, A Comparison Study of Canonical Correlation Analysis Based Methods for Detecting Steady-State Visual Evoked Potentials, *PLoS one*. 10 (2015) e0140703. doi:10.1371/journal.pone.0140703.
- [20] D. Kim, W. Byun, Y. Ku, J.H. Kim, High-speed visual target identification for low-cost wearable brain-computer interfaces, *IEEE Access*. 7 (2019) 55169–55179. doi:10.1109/ACCESS.2019.2912997.
- [21] S. Ajami, A. Mahnam, V. Abootalebi, Development of a practical high frequency brain-computer interface based on steady-state visual evoked potentials using a single channel of EEG, *Biocybernetics and Biomedical Engineering*. 38 (2018) 106–114. doi:10.1016/j.bbe.2017.10.004.
- [22] C. Jia, X. Gao, B. Hong, S. Gao, Frequency and phase mixed coding in SSVEP-based brain-computer interface., *IEEE transactions on bio-medical engineering*. 58 (2011) 200–206. doi:10.1109/TBME.2010.2068571.
- [23] F.-B. Vialatte, M. Maurice, J. Dauwels, A. Cichocki, Steady-state visually evoked potentials: Focus on essential paradigms and future perspectives, *Progress in Neurobiology*. 90 (2010) 418–438. doi:10.1016/j.pneurobio.2009.11.005.
- [24] A.T. Sozer, Enhanced Single Channel SSVEP Detection Method on Benchmark Dataset, içinde: *2018 15th International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control, CCE 2018, IEEE*, 2018: ss. 1–4. doi:10.1109/ICEEE.2018.8533933.
- [25] Y. Zhang, J. Jin, X. Qing, B. Wang, X. Wang, LASSO based stimulus frequency recognition model for SSVEP BCIs, *Biomedical Signal Processing and Control*. 7 (2012) 104–111. doi:10.1016/j.bspc.2011.02.002.
- [26] R.M.G. Tello, S.M.T. Muller, T. Bastos-Filho, A. Ferreira, A comparison of techniques and technologies for SSVEP classification, içinde: *5th ISSNIP-IEEE Biosignals and Biorobotics Conference (2014): Biosignals and Robotics for Better and Safer Living (BRC)*, IEEE, 2014: ss. 1–6. doi:10.1109/BRC.2014.6880956.
- [27] Z. Lin, C. Zhang, W. Wu, X. Gao, Frequency recognition based on canonical correlation analysis for SSVEP-Based BCIs, *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*. 54 (2007) 1172–1176. doi:10.1109/TBME.2006.889197.

- [28] Y. Wang, X. Chen, X. Gao, S. Gao, A Benchmark Dataset for SSVEP-Based Brain–Computer Interfaces, *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*. 25 (2017) 1746–1752. doi:10.1109/TNSRE.2016.2627556.
- [29] G. Bin, X. Gao, Z. Yan, B. Hong, S. Gao, An online multi-channel SSVEP-based brain–computer interface using a canonical correlation analysis method, *Journal of Neural Engineering*. 6 (2009) 046002. doi:10.1088/1741-2560/6/4/046002.
- [30] J. Pan, X. Gao, F. Duan, Z. Yan, S. Gao, Enhancing the classification accuracy of steady-state visual evoked potential-based brain-computer interfaces using phase constrained canonical correlation analysis., *Journal of neural engineering*. 8 (2011) 036027. doi:10.1088/1741-2560/8/3/036027.
- [31] T.H. Nguyen, W.Y. Chung, A single-channel SSVEP-based BCI speller using deep learning, *IEEE Access*. 7 (2019) 1752–1763. doi:10.1109/ACCESS.2018.2886759.
- [32] Q. Gao, Y. Zhang, Z. Wang, E. Dong, X. Song, Y. Song, Channel Projection-Based CCA Target Identification Method for an SSVEP-Based BCI System of Quadrotor Helicopter Control, *Computational Intelligence and Neuroscience*. 2019 (2019). doi:10.1155/2019/2361282.
- [33] A.T. Sözer, C.B. Fidan, Novel spatial filter for SSVEP-based BCI: A generated reference filter approach, *Computers in Biology and Medicine*. 96 (2018) 98–105. doi:10.1016/j.compbiomed.2018.02.019.
- [34] Y. Wang, R. Wang, X. Gao, B. Hong, S. Gao, A practical VEP-based brain-computer interface, *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*. 14 (2006) 234–239. doi:10.1109/TNSRE.2006.875576.
- [35] A.T. Sözer, C.B. Fidan, Novel Detection Features for SSVEP Based BCI: Coefficient of Variation and Variation Speed, *BRAIN: Broad Research in Artificial Intelligence and Neuroscience*. 8 (2017) 144–150. <https://www.edusoft.ro/brain/index.php/brain/article/view/694/782>.

ORÇ ile Düşük Sıcaklıklı Isı Kaynaklarından Elektrik Üretilmesinde Islak ve Yeni Nesil Akışkanların Çevresel ve Termodinamik Performanslarının Karşılaştırılması

Sadık ATA¹  Muhammed Emin BOYACIOĞLU²  Remzi ŞAHİN¹  Ali KAHRAMAN³ 

¹ KTO Karatay Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 42020, Konya, Türkiye
(Sorumlu Yazar/ Corresponding Author)

² Necmettin Erbakan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, 42090, Konya, Türkiye

³ Necmettin Erbakan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 42090, Konya, Türkiye

Makale Bilgileri

Makale Geçmişi

Geliş: 22.02.2021

Kabul: 24.05.2021

Yayın: 30.06.2021

Anahtar Kelimeler:

Çevresel Performans,
Yeni Nesil Akışkanlar,
Düşük Sıcaklıklı Organik
Rankine Çevrimi (ORÇ),
Ekserji.

ÖZET

Organik Rankine Çevrimi (ORÇ), termal enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren, yüksek oranda erişilebilir, yaygın olarak kullanılan bir enerji üretim şeklidir. ORÇ’de, türbin jeneratörü termal enerjiyi önce mekanik enerjiye sonra da jeneratör aracılığıyla elektrik enerjisine dönüştürür. Sıradan buhar türbinleri ile karşılaştırıldığında; ORÇ sisteminde dolaşan organik akışkanlar su buharının yerini alır, ancak sudan daha yüksek moleküler ağırlıklı organik sıvıları buharlaştırarak sirkülasyon hızını düşürür ve metal parçalar üzerindeki basıncı azaltır. ORÇ’nin ideal akışkanları genellikle sıfır veya pozitif eğimli sırasıyla ıslak veya yeni nesil akışkanlar olup, aşırı ısıtılmasına gerek yoktur. Bu çalışmada düşük kapasiteli değişik ısı kaynaklı, organik akışkanlı ve konfigürasyonlu ORÇ tasarımı ve termodinamik optimizasyonu yapılmıştır. Bu çalışmadaki termodinamik analiz Engineering Equation Solver kullanılarak yapılmıştır. ORÇ’de farklı akışkan gruplarının etkisi belirlenmiştir. Akışkan tipini önemli kılan en önemli etken türbinde akışkanın genişlemesinden sonra kuruluk oranının akışkanın tipine göre değişmesidir. R290, R32, R152a, R134a, R125, R1270, R1234ze, R1234yf gibi yeni nesil ve ıslak akışkanlar kullanılarak organik akışkanların tasarım değerlendirmeleri yapılmıştır. Akışkan türleri kendi aralarında incelendiğinde R152a’nın özellikle elde edilen türbin işi bakımından R134a’dan çok iyi durumda olduğu, R1234ze’nin ise R1234yf’den ısı verim ve ekserji verimi bakımından önde olduğu görülmektedir.

Comparison of Environmental and Thermodynamic Performance of Wet and New-Generation Fluids for Electricity Generation from Low Temperature Heat Sources with ORC

Article Info

Article History

Received: 22.02.2021

Accepted: 24.05.2021

Published: 30.06.2021

Keywords:

Environmental
Performance, New
Generation Fluids,
Low Temperature
Organic Rankine
Cycle (ORC), Exergy.

ABSTRACT

The organic Rankine Cycle (ORC) is a highly accessible, widely used form of energy generation that converts thermal energy into electrical energy. ORC converts the thermal energy of the turbine generator first into mechanical energy and then into electrical energy through the generator. Compared with ordinary steam turbines; Organic fluids circulating in the ORC system replace water vapor, but by evaporating organic liquids with higher molecular weight than water, it reduces the circulation rate and reduces the pressure on the metal parts. The ideal fluids of ORC are generally wet or new generation fluids with zero or positive slope, respectively, and they do not need to be overheated. In this study, ORC design and thermodynamic optimization with low capacity, different heat source, organic fluid and configuration have been made. The thermodynamic analysis in this study was performed using Engineering Equation Solver. The effect of different fluid groups has been determined in ORC. The most important factor that makes the fluid type important is that the dryness rate changes according to the type of fluid after the fluid expands in the turbine. Design evaluations of organic fluids were made using new generation and wet fluids such as R290, R32, R152a, R134a, R125, R1270, R1234ze, R1234yf. When the fluid types are examined among themselves, it is seen that R152a is in a better condition than R134a especially in terms of turbine work achieved, and R1234ze is ahead of R1234yf in terms of thermal efficiency and exergy efficiency.



Atıf/Citation: Ata, S.; Boyacıoğlu, ME.; Şahin, R.; Kahraman, A. (2021). Orç ile düşük sıcaklıklı ısı kaynaklarından elektrik üretilmesinde ıslak ve yeni nesil akışkanların çevresel ve termodinamik performanslarının karşılaştırılması, *Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 3(1), 13-23.

“This article is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/). (CC BY-NC 4.0)”

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Organik Rankine Çevrimi (ORÇ) ısı enerjisini elektrik enerjisine çeviren, kullanılabilirliği yüksek, oldukça yaygın kullanılan bir enerji üretim biçimidir. ORÇ çalışma prensibi olarak turbo jeneratörün ısı enerjisini önce mekanik enerjiye, sonra ise bir elektrik jeneratörü vasıtasıyla elektrik enerjisine dönüşümüdür. Normal buhar türbiniyle karşılaştırıldığında; ORC sistemi su buharı yerine moleküler ağırlığı sudan yüksek olan ve böylece daha yavaş devir hızına ve metal aksamlara daha az basınca yol açan bir organik sıvıyı buharlaştırır. ORÇ için ideal akışkanlar genellikle aşırı ısınmayı gerektirmeyen sırasıyla sıfır veya pozitif eğimli ıslak veya yeni nesil akışkanlardır.

ORÇ sayesinde yüksek verim elde edilir: %2.5'lik bir ısı kaybı dışında termal yağdan %76.5 oranında termal güç ısıya, %21 ise elektriğe çevrilir. Bunun sonucu olarak ORÇ güvenilir, verimli bir elektrik üretme yoludur. Özellikle biyokütle ve jeotermal alanında önemli büyüme fırsatlarına ve ısı geri kazanımı, atığın enerjiye dönüşümü ve güneş enerjisi uygulamalarındaki üstün işlevlerine sahiptir.

Literatür incelendiğinde ORÇ analizi ve akışkan seçimi hakkında yapılmış farklı çalışmaların olduğu görülür. Wang vd [1]; Hidrofloroeter kullanılarak tasarlanan ORÇ sisteminin termodinamik analizini yapmışlardır. EES planından yararlanıyorlar. HFE7000, HFE7100 ve HFE7500 organik sıvılarının birincil verimliliği, net gücü ve türbin boyutu faktörü türbin giriş sıcaklığı ile karşılaştırılır. Uusitalo vd. [2], ORÇ sisteminin termodinamik performansının belirlenmesinde organik akışkan türü ve akışkanın termofiziksel özelliklerinin etkisini araştırmıştır. Akışkanın kritik sıcaklığının ve molar kütesinin sistem üzerindeki etkisi belirlenmiştir. Çalışma sonunda, buhar basıncı akışkanın kritik basıncından daha düşük olduğunda kritik sıcaklığı yüksek bir akışkan içinde yüksek verim elde edilebileceği belirtildi. Ancak, yüksek kritik sıcaklığın türbinde yüksek bir genişleme oranına yol açtığı gözlemlenmiştir. Florokarbonların ve düşük sıcaklık kritik hidrokarbonların düşük sıcaklıktaki ORÇ uygulamalarında; siloksanlar ve yüksek kritik sıcaklıklara sahip hidrokarbonların yüksek sıcaklık ORÇ uygulamaları için uygun olduğu bulunmuştur. Ergün [3] doktora çalışmasında, Çanakkale Ayvacık ilçesine bağlı Tuzla köyündeki jeotermal ORÇ santralının termodinamik analizini yapmıştır. Analiz sonucunda, sistemdeki en yüksek kayıp değerinin kondenserde 24410 kW ile tespit edilmiştir. Eyidoğan [4] doktora araştırmasında biyokütleden elde edilen termal yağı elektrik ve ısı (sıcak su) üretmek için kullanan ORÇ cihazının enerji ve ekserji analizini yapmıştır. Araştırmanın temelini oluşturan veriler, entegre ahşap sektöründe faaliyet gösteren bir sanayi firmasının ORÇ departmanından gelmektedir. ORÇ cihazının ana ekipmanı olan evaporatör, kondenser, türbin ve rejeneratörün enerji ve ekserji analizleri altı farklı çalışma koşulunda (tam yük ve kısmi yük) analiz edilmiştir. Giuffrida [5], yeni nesil organik sıvılar kullanan ORÇ'de 2 kW spiral kompresör kullanarak sistemin performansını çevresel faktörler nedeniyle analiz etti. Sonuçları şu anda kullanımda olan R245fa sıvısı ile karşılaştırdı. İnceleme sıvısı; R1234yf, R1234ze(E), R1234ze(Z), R1243zf, R1336mzz(Z), R1224yd(Z), R1233zd(E). REFPROP yazılımı akışkan özellikleri için kullanılır. R245fa sıvısının GWP değeri 858 olmasına rağmen, seçilen tüm sıvılarda değerin 1'den küçük olduğu belirtilmektedir. Çalışmada ısıl verimlilik açısından R1224yd(Z) ve R1233zd(E) sıvılarının R245fa sıvısı kullanan sistemlere göre daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Yang vd. [6], ORÇ sistemi analizinde iki sıvıyı karşılaştırarak deneysel bir çalışma yürütmüştür. Sistem, mevcut sistemde kullanılan R245fa sıvısı yerine iyi çevresel özelliklere sahip R1233zd(E) sıvısını kullanmaktadır. Deneysel çalışmada, R1233zd(E) sıvısı kullanan sistemin ısıl veriminin %3.8, elektrik gücünün ise %4.5 arttığı tespit edilmiştir. Elde edilen verilere göre, R1233zd(E) sıvısının R245fa sıvısının yerine geçen bir sıvı olduğu söylenebilir. Behzadi vd. [7] Tahran ORÇ entegre enerji santralının çok amaçlı optimizasyonu ve ekserji ekonomik analizi gerçekleştirildi. MATLAB tabanlı GA tabanlı çok amaçlı optimizasyon teknolojisini kullanırlar. Bademlioğlu ve ark. [8], $\Delta T_{PP,e}$ 'nin ORÇ'nin ekserji performansı üzerindeki etkisini araştırmıştır. $T_{PP,e}$ 'yi 5-20 °C arasında değiştirmenin farklı organik akışkanlarla hazırlanmış sistemler üzerindeki etkisini

belirlenmiştir. Şahin vd. [9], ORÇ performansında akışkan seçiminin rolü ekserji analizi yapılarak belirlenmiştir. Çalışma sonucunda, en yüksek ısı verim %7.78 ve ekserji verimine %41.05 R290 akışkanının ulaştığı görülmüştür. R290 akışkanında oluşan tersinmezliğin %60'ının evaporatörde olduğu, %30'unun da kondenserde olduğunu belirlemişlerdir. Xi vd. [10], R123, R11, R245ca, R245fa, R113 ve R141b olmak üzere altı farklı organik akışkanın performansı karşılaştırılmıştır. R245fa'nın net güç maksimizasyonu için en iyi değere ulaştığı görülmüştür. R141b ve R11 akışkanlarının daha iyi termodinamik performans verdiklerini tespit etmişlerdir. Rahbar vd. [11], ORÇ'de küçük ölçekli radyal türbinin performansı 8 organik akışkan kullanılarak incelenmiştir. Çalışma sonucunda, radyal türbin veriminin %82.9 ile %84 arasında olduğu belirtilmiştir. Sarkar [12], ORÇ'de maksimum ısı geri kazanımı için $\Delta T_{PP,e}$ tasarımı ve optimizasyonu üzerinde çalışmıştır. Optimum noktalarda düşük kütleli debi gereksinimi, yüksek ekserji gerimi, düşük türbin boyutu bakımından amonyak akışkanında; yüksek güç çıktısı ve ısı geri kazanımı verimi bakımından ise izopentan akışkanında en iyi sonuçlara ulaşılmıştır. Li vd. [13], çevresel özellikleri iyi durumda yeni nesil organik bir akışkan olan R1234ze ile tasarladıkları kritik altı ORÇ ve transkritik ORÇ sisteminin performans analizini yapmışlardır. Isı kaynağı giriş sıcaklığı 100-160 °C olan sistemler için kritik altı ORÇ'nin; 160-200 °C olan sistemler için ise transkritik ORÇ'nin uygun olduğu tespit edilmiştir. Zhu vd. [14], ORÇ performansında organik akışkanların önemini incelediler. Çalışma sonunda, daha yüksek bir net güç değeri elde etmek için organik akışkanların kritik sıcaklığı ile ısı kaynağının sıcaklığı arasındaki farkın küçük olması gerektiğini belirlediler. Velez vd. [15], ORÇ sisteminin analizi için su, bazı hidrokarbonlar ve soğutucular gibi farklı akışkanlar üzerinde çalışmışlardır. Çalışmalarında, basınç oranı ve türbin giriş sıcaklığının artışı ile sistem ısı veriminin arttığını belirtmişlerdir. Maksimum ısı verim değeri ise %9 olarak belirlemişlerdir. Javanshir ve Sarunac [16], ıslak, izantropik ve kuru akışkan gruplarından olmak üzere 23 farklı akışkan ile çalışan ORÇ'nin performansı ısı verim ve net güç çıktısı bakımından analiz edilmiştir. Çalışma sonucunda izantropik akışkanların veriminin kuru ve ıslak akışkanlara göre daha iyi olduğu sonucuna varılmıştır.

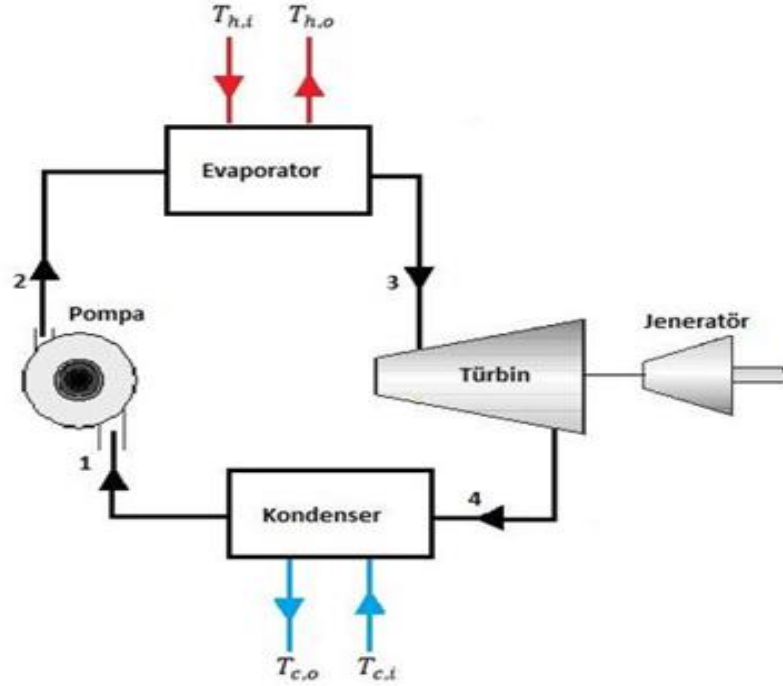
Bu çalışmanın amacı ORÇ sisteminde ıslak ve yeni nesil akışkanların sistem parametreleri üzerindeki etkilerini belirlemek, akışkanların sistem üzerindeki çevresel ve termodinamik etkilerini karşılaştırmaktır. Çalışmada 8 farklı akışkan kullanılmış olup belirlenen sistem parametreleri için en iyi performans gösteren farklı sınıflardan akışkanlar belirlenmiştir.

MATERYAL VE METOT (MATERIALS AND METHODS)

Bu çalışmada ıslak ve yeni nesil organik akışkanlar kullanılarak tasarlanan ORÇ'nin termodinamik analizi ve özellikleri Engineering Equation Solver (EES) belirlenmiştir. EES yazılımını kullanma nedenleri; veri tabanında bulunan birçok organik sıvının termodinamik özelliklerini içermesidir. Termodinamik analiz için gerekli denklemler sisteme girilerek, aynı anda birçok parametrede meydana gelen değişikliklere yanıt olarak istenen sonuçlar elde edilebilir. Farklı sıvılar kullanmanın sistem performansı üzerindeki etkisini görmek kolaydır. EES yazılımı, geri döndürülemez ilişkiyi sistemle işleyerek, geri döndürülemez değeri belirli bir sıcaklık veya basınç aralığında negatif bir değere ulaşan bileşenleri tespit etmek için denklem çözücü işlevini ve termodinamik verilerini kullanır. Bu şekilde hazırlanan modelin termodinamiğin ikinci yasasına uygunluğu kontrol edilmiştir.

ORÇ'de üç farklı tip akışkanın sistem performansındaki etkisi belirlenmiştir. Şekil 1'de ORÇ çalışma prensibi gösterilmiştir. Organik akışkan (ara sıvı) düşük basınçtan yüksek basınca pompalanır. Akışkan sıvı halde olduğu için, pompa az miktarda enerji girişi gerektirir. Yüksek basınçlı sıvı, sabit bir basınçta büyük bir ısı kaynağı tarafından ısıtıldığı ve doymuş kuru buhar haline geldiği kazana girer. Gerekli giriş enerjisi, bir entalpi-entropi tablosu (h-s diyagramı veya Mollier diyagramı) kullanılarak grafiksel olarak kolayca hesaplanabilir veya gerekli giriş enerjisi, bir buhar ölçer kullanılarak dijital olarak kolayca hesaplanabilir. Doymuş kuru buhar fazındaki çalışma sıvısı, enerji üreten bir türbin tarafından genişletilir. Bu, sıvı ve buhar

basıncını düşürür ve biraz yoğunlaşmaya neden olabilir. Islak buhar, yoğunlaştırıcıya (yoğunlaştırıcı) girer ve sabit bir basınçta doymuş bir sıvıya yoğunlaşır. Sonuç olarak termal enerji mekanik enerjiye dönüştürülerek elektrik enerjisi elde edilmiş olur.



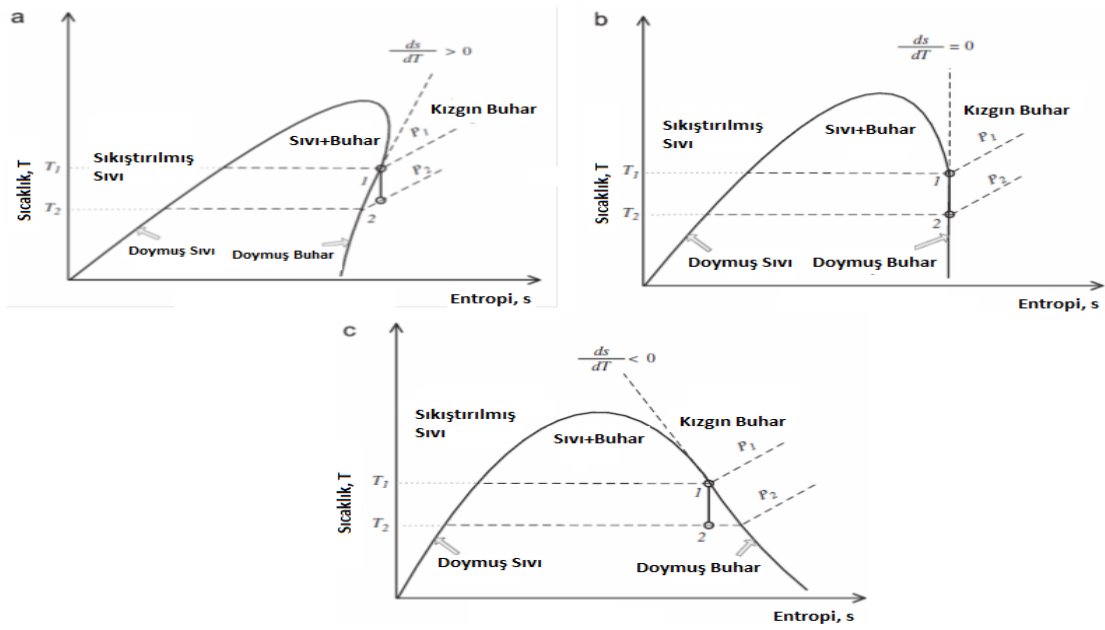
Şekil 1. Organik Rankine Çevrimi Çalışma Prensibi

Bu çalışmada ORÇ'de farklı akışkan gruplarının etkisi belirlenmiştir. Akışkanlar doymuş buhar eğrisinin eğimine göre Şekil 2 'de gösterildiği gibi kuru, yeni nesil ve ıslak olmak üzere üç grupta incelenir. Akışkan tipini önemli kılan en önemli etken türbinde akışkanın genişlemesinden sonra kuruluk oranının akışkanın tipine göre değişmesidir. Akışkanların T-s diyagramlarındaki doyma eğrilerinin eğimi pozitif olduğunda akışkan kuru, negatif olduğunda ıslak ve sonsuz olduğunda ise izantropik olarak isimlendirilir.

Organik akışkanlar ıslak ve yeni nesil olmak üzere iki farklı kategori altında sınıflandırılarak performansı karşılaştırılmıştır. Islak akışkanlardan 6, yeni nesil akışkanlardan 2 olmak üzere toplam 8 akışkanın performansı aynı tasarım parametreleri altında belirlenmiştir. Bu akışkanlar Tablo 1'de belirtilmiştir.

ORÇ'nin jeotermal ısı kaynaklı uygulamaları kapsamında ısı kaynağı sıcaklığı $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ olarak sabit belirlenmiştir. Soğutma suyu sıcaklığı ise $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, türbin ve pompa izantropik verimleri de %75 olarak ele alınmıştır. Ölü nokta basıncı ve sıcaklığı sırasıyla 100 kPa ve $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ olarak kabul edilmiştir. Bu bölümde yapılan diğer kabuller aşağıda belirtilmiştir.

- Bütün prosesler kararlı şartlardadır.
- Evaporatör ve kondenserdeki basınç kayıpları ihmal edilmiştir. Boru hatlarındaki kayıplar ihmal edilmiştir.
- Analizde tüm ekipmanlar adyabatik olarak kabul edilmiş ve yüzeyleri ile çevre arasında bir ısı transferinin olmadığı varsayılmıştır.
- Potansiyel ve kinetik enerji değişimleri ihmal edilmiştir.



Şekil 2. Organik Akışkanların T-s Diyagramında Gösterimi a) Kuru, b) İzantropik, c) Islak [17].

Tablo 1. Farklı Kategorilerden Belirlenen Organik Akışkanlar

Islak Akışkanlar	Yeni Nesil Akışkanlar
R290	R1234ze
R32	R1234yf
R152a	
R134a	
R125	
R1270	

ORÇ'nin termodinamik analizinde kullanılan denklemler aşağıda belirtilmiştir.

Aşağıdaki çizelgede verilen denklemlerde; η_t ve η_p sırasıyla türbin ve pompanın izantropik verimleri, $T_{h,i}$ ve $T_{h,o}$ sırasıyla ısı kaynağı giriş-çıkış; $T_{c,i}$ ve $T_{c,o}$ ise sırasıyla soğutma suyu giriş-çıkış sıcaklıklarıdır. Tablo 2'de verilen T_h ve T_c ise denklem (1) ve (2)'de tanımlanmıştır.

$$T_h = (T_{h,i} - T_{h,o}) / \ln(T_{h,i} - T_{h,o}) \quad (1)$$

$$T_c = (T_{c,i} - T_{c,o}) / \ln(T_{c,i} - T_{c,o}) \quad (2)$$

BULGULAR (RESULTS)

Organik Akışkanların Termofiziksel Özelliklerinin Değerlendirilmesi (Evaluation of Thermophysical Properties of Organic Fluids)

Tablo 3'de ORÇ tasarımında kullanılan ıslak ve yeni nesil akışkanların termofiziksel özellikleri karşılaştırılmıştır. Seçilen ıslak akışkanlardan kaynama noktası sıcaklığı en düşük olan akışkan R32, yeni nesil akışkanlarda ise R1234yf olarak belirlenmiştir. Kritik sıcaklık değeri ıslak akışkanlar arasında en yüksek olan akışkan R152a, yeni nesil akışkanlar arasında ise R1234ze olduğu belirtilmiştir. R125 ve R32'nin kritik sıcaklıkta daha düşük değerlere sahip olduğu, diğer akışkanların birbirine yakın olduğu görülebilmektedir. 30 °C'ye karşılık gelen tüm akışkanların yoğuşma basıncını ve 100 °C'lik buharlaşma

basıncını kontrol ederken, ıslak akışkanın diğer akışkan türlerinden daha yüksek bir basınç değerine sahip olduğuna dikkat etmek önemlidir. Islak sıvıda R152a ve R134a en düşük basınç değerine ulaşır.

Tablo 2. ORÇ Termodinamik Analiz Bağıntıları

BİLEŞENLER	ENERJİ ANALİZİ	EKSERJİ ANALİZİ
Pompa	Pompa İşi (kJ/kg) $w_p = (h_2 - h_1) = (h_{2s} - h_1)/\eta_p$	Pompa Tersinmezliği (kJ/kg) $i_p = T_0(s_2 - s_1)$
Evaporatör	Evaporatör ısı girişi (kJ/kg) $q_e = (h_3 - h_2)$	Evaporatör Tersinmezliği (kJ/kg) $i_e = T_0[(s_3 - s_2) - (h_3 - h_2)/T_h]$
Türbin	Türbin İşi (kJ/kg) $w_t = (h_3 - h_4) = (h_3 - h_{4s})\eta_t$	Türbin Tersinmezliği (kJ/kg) $i_t = T_0(s_4 - s_3)$
Kondenser	Kondenserde Atılan Isı Miktarı (kJ/kg) $q_c = (h_4 - h_1)$	Kondenser Tersinmezliği (kJ/kg) $i_k = T_0[(s_1 - s_4) + (h_4 - h_1)/T_c]$
	Net İş (kJ/kg) $w_{net} = q_e - q_c$	Toplam Tersinmezlik (kJ/kg) $i_{toplam} = i_p + i_e + i_t + i_c$
Sistem	Isıl Verim $\eta_{isil} = w_{net}/q_e$	Harcanan Ekserji (kJ/kg) $e_{harcanan} = [1 - T_0/T_H]q_e + w_p$
		Ekserji Verimi $\eta_{II} = 1 - i_{toplam}/e_{harcanan}$

Tablo 3. Kendi kategorilerinde en iyi performans gösteren akışkanların ve yeni-nesil organik akışkanların çevresel etkisi [18]

Akışkanlar/ Özellikler	R290	R32	R125	R1270	R152a	R134a	R1234yf	R1234ze
Molekül Ağırlığı (g/mol)	44.10	52.02	120.02	42.08	66.05	102.03	114.04	114.04
Kaynama Noktası (°C)	-42.1	-51.7	-48.1	-47.7	-24	-26.1	-29.3	-18.8
Kritik Sıcaklık Değeri (°C)	96.7	78.1	66	92.4	113.3	101.1	94.85	109.52
Kritik Basınç Değeri (MPa)	4.25	5.78	3.62	4.66	4.52	4.06	3.38	3.63
ASHRAE standartları güvenlik sınıfı	A3	A2	A1	A3	A2	A1	A2L	A2L
ODP	0	0	0	0	0	0	0	0
GWP	20	675	3500	20	124	1430	4	6

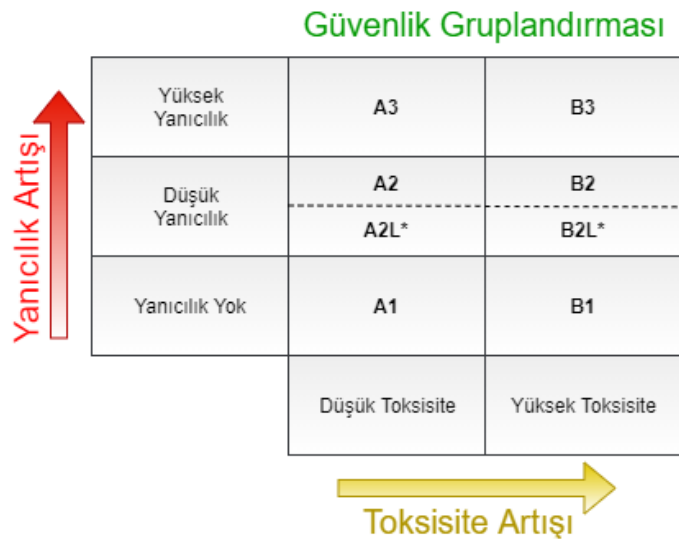
Organik Akışkanların Çevresel Özelliklerinin Değerlendirilmesi (Evaluation of Environmental Properties of Organic Fluids)

Tablo 4’de ORÇ tasarımında kullanılan kuru ve izantropik akışkanların çevresel özellikleri karşılaştırılmıştır. Ozon Yok Etme Potansiyeli (ODP) 8 akışkan için 0 olduğu ve Küresel Isınma Potansiyeli (Global Warming Potential-GWP) değerinin en yüksek R125 akışkanında olduğu görülmektedir.

Tablo 4. Islak ve Yeni Nesil Akışkanların Çevresel Özellikleri [18]

Akışkanlar/ Özellikler	R290	R32	R152a	R134a	R125	R1270	R1234yf	R1234ze
ASHRAE standartları güvenlik sınıfı	A3	A2	A2	A1	A1	A3	A2L	A2L
ODP	0	0	0	0	0	0	0	0
GWP	20	675	124	1430	3500	20	4	6

Bu bölümde ORÇ tasarımında kullanılan akışkanların çevresel özellikleri kapsamında GWP ve ASHR güvenlik sınıfı belirtilmiştir. ASHR güvenlik sınıfına dair gruplandırma da Şekil 3’de verilmiştir.

**Şekil 3.** Akışkanların çevresel özelliklerini belirleyen güvenlik gruplandırması

*Şekil 3’de A2L ve B2L düşük yanıcılık değeri olan ve maksimum yanma hızı 10 cm/s olan akışkanları ifade etmektedir.

Organik Akışkanların Termodinamik Performanslarının Belirlenmesi (Determination of Thermodynamic Performance of Organic Fluids)

Bu bölümde ıslak ve yeni nesil akışkanların ORÇ performansına etkisi belirlenmiştir. Performans parametreleri pompa işi(kJ/kg), türbin işi(kJ/kg), ısı girdisi(kJ/kg) ısı verim ve ekserji verimi olarak belirlenmiştir. Isı kaynağı sıcaklığı jeotermal uygulamaları kapsamında 110 °C olarak belirlenmiştir. Buharlaşma sıcaklığının 65-100 °C arasında değişmesinin sistem performansı üzerindeki etkisi belirlenmiştir.

Şekil 4’de görüldüğü üzere ıslak akışkanların 100 °C buharlaşma sıcaklığı altında ulaştıkları analiz sonuçları dikkate alınarak en iyi performans gösteren 2 ıslak akışkanın R152a ve R134a olduğu görülmektedir. Isıl verim ve ekserji verimi yönünden en iyi değerlere R152a’da ulaşıldığı ve aynı zamanda sadece R134a’da belli bir buharlaşma sıcaklığı değerinden sonra (98 °C) ısı verim ve ekserji veriminin azalmaya başladığı gözlenmiştir.

En düşük performans değerlerinin R125’li sistemde elde edildiği, türbin işi performansı bakımından en iyi değerlere R290 ve R1270’li sistemde ulaşılmasına rağmen, yüksek ısı girdisi ihtiyacından dolayı ısı verim sıralamasında R152a ve R134a’nın gerisinde kaldığı belirlenmiştir. R134a’nın yüksek ısı verim ve ekserji veriminin olmasının yanı sıra toplam tersinmezlik değerinin de düşük olduğu görülmektedir. Yeni nesil akışkanlarda ise ısı veriminde R1234ze akışkanın yüksek olduğu görülmektedir.

Şekil 5’te tüm akışkanların 100 °C buharlaşma sıcaklığı altında türbin giriş basıncı, buharlaşma entalpisi(h_{fg}), türbin çıkışı buharın kuruluk derecesi gibi değerler belirlenmiştir. En yüksek Türbin giriş basıncı ıslak akışkanlarda R32’de yeni nesil akışkanda ise R1234yf’de olduğu belirlenmiştir. Islak akışkanlarda buharlaşma entalpisi değeri en fazla R290 en düşük R125 de gözlemlenirken yeni nesil akışkanlarda ise R1234ze’nin, R1234yf den fazla buharlaşma entalpisi değerine ulaştığı belirlenmiştir. İncelenen diğer bir parametrede ise türbin çıkış kuruluk derecesi en fazla R134’a de gözlemlenirken yeni nesil akışkanda ise R1234ze’de gözlemlenmiştir.

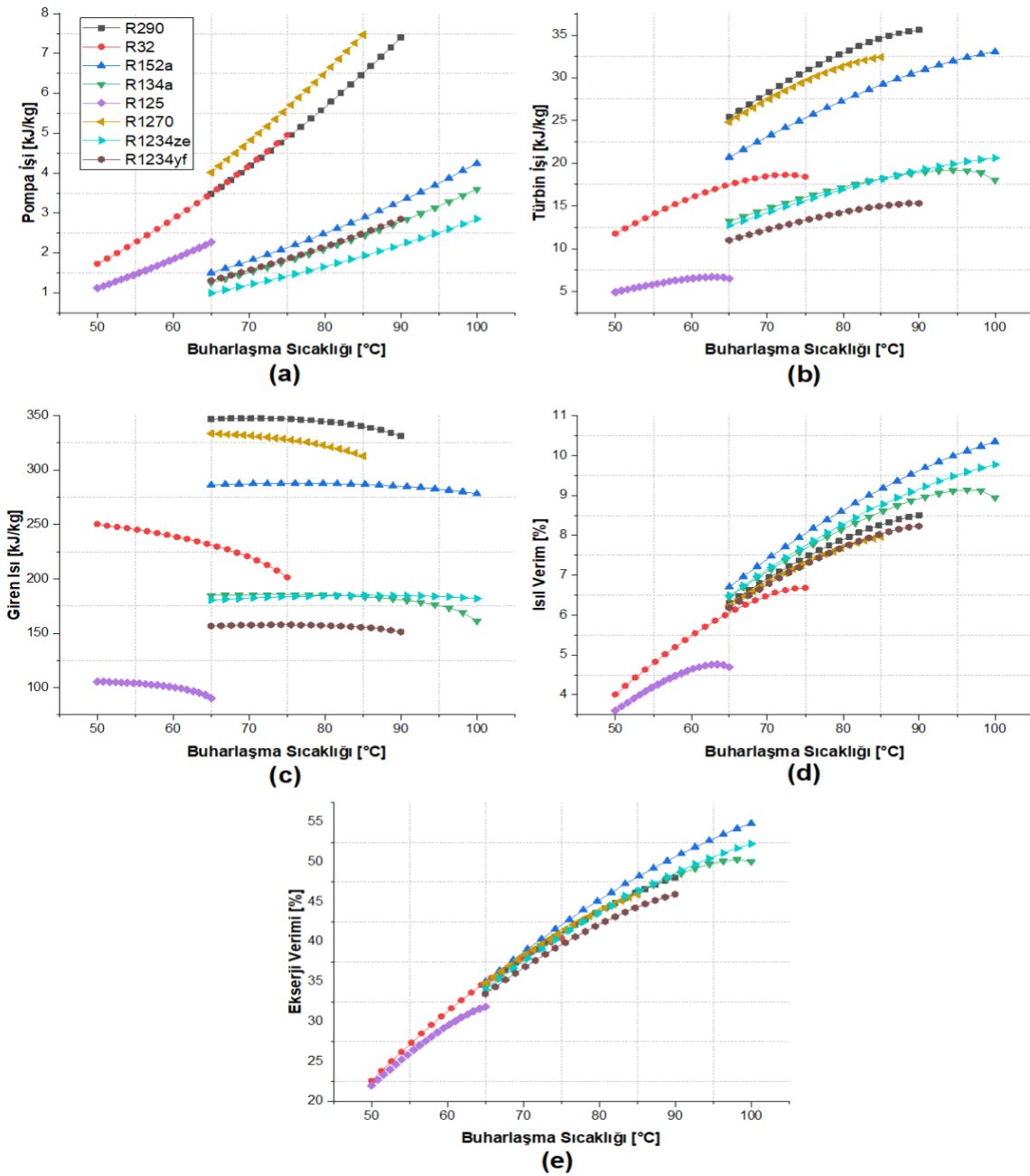
TARTIŞMA VE SONUÇLAR (DISCUSSION AND CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, organik akışkan seçimi 3 farklı kriter üzerinden değerlendirilmiştir. Bunlar termofiziksel özellik, çevresel özellik ve termodinamik performanstır. Bu çalışmada EES, ıslak ve yeni nesil organik akışkanlar kullanılarak tasarlanan ORÇ’nin termodinamik özelliklerini belirlemiştir. R290, R32, R152a, R134a, R125, R1270, R1234ze, R1234yf gibi yeni nesil ve ıslak akışkanlar kullanılarak organik akışkanların tasarım değerlendirmeleri yapılmıştır. Aynı zamanda ıslak akışkanlar için buharlaşma sıcaklığı değişiminin performans parametreleri üzerindeki etkisi gözlemlenmiştir.

Belirlenen akışkanların çevresel özellikleri incelendiğinde tüm akışkanlar için ODP değerlerinin 0 olduğu görülürken, GWP değerlerinde yeni nesil akışkanların ıslak akışkanlara göre daha düşük değerlere sahip oldukları belirlenmiştir. ASHRAE standartları güvenlik sınıfına göre en düşük yanıcılık ve toksisite değerlerine R134a ve R125 sahip iken bu akışkanlar aynı zamanda en yüksek GWP değerlerine de sahip oldukları görülmüştür.

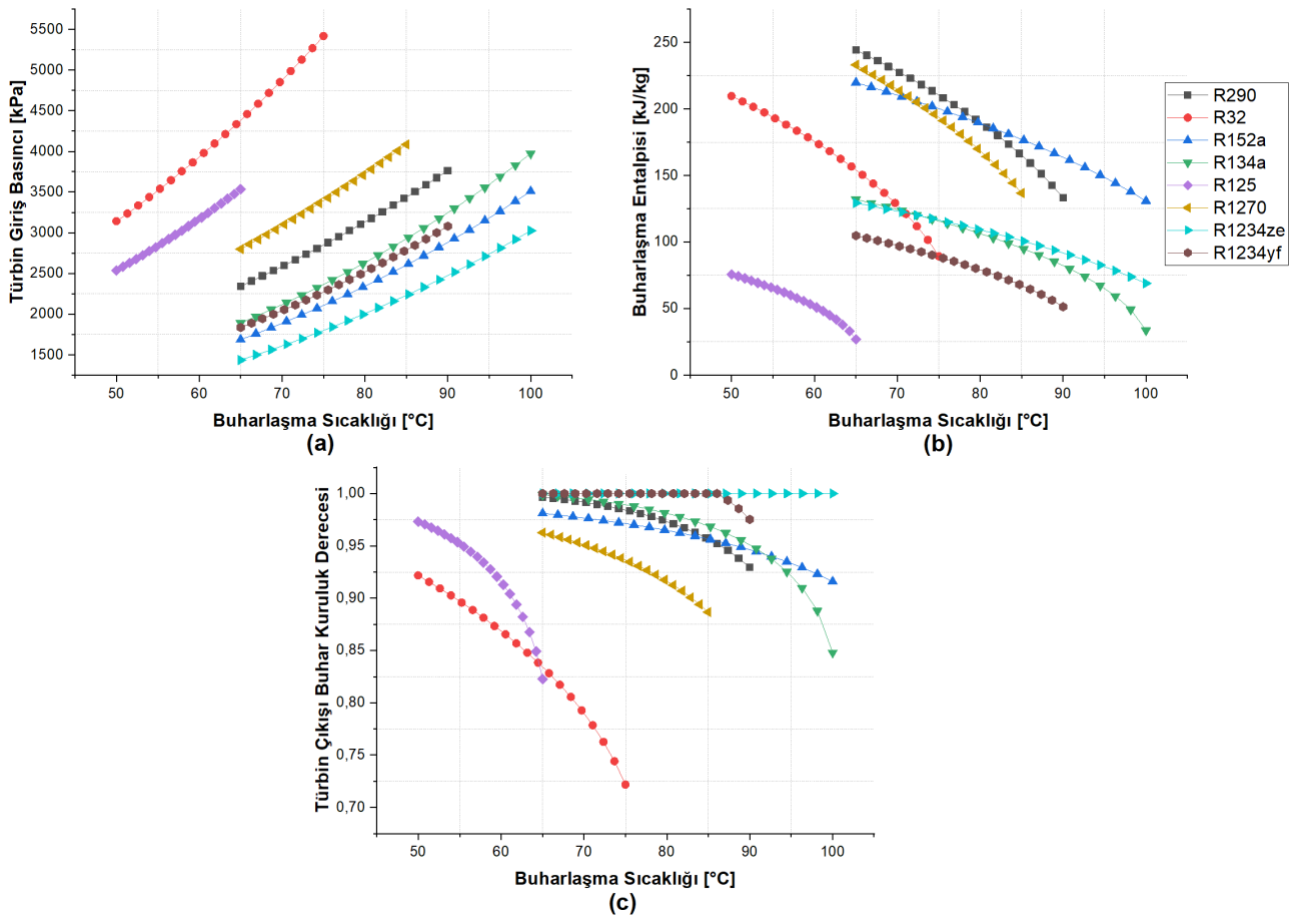
Bu çalışma sonucunda yeni nesil organik akışkanların ıslak akışkan türüne yakın özellikler sergilediği görülmüştür. Fakat yeni nesil organik akışkanların daha düşük yoğunlaşma ve buharlaşma basınç değerlerine sahip olduğu ve daha az pompa gücüne ihtiyaç duyduğu dikkat çekmektedir. Performans parametreleri altında ise özellikle R1234ze’nin R134a’dan daha iyi fakat R152a’dan ise daha düşük performansla sahip olduğu görülmektedir.

Tüm akışkanların 100 °C buharlaşma sıcaklığı altında ısı verim, türbin işi, ekserji verimi ve toplam tersinmezlik değerleri belirlenmiştir. Akışkanlar kendi kategorilerinde incelendiğinde R152a’nın özellikle elde edilen türbin işi bakımından 33.05 kJ/kg ile R134a’dan (18.03 kJ/kg) daha iyi performans gösterdiği, R1234ze’nin ise R1234yf’den ısı veriminde sırasıyla %9.77 ve %8.23, ekserji veriminde sırasıyla %52.3 ve %45.98 olarak önde olduğu görülmektedir.



Şekil 4. Kuru ve ıslak akışkanların termodinamik performanslarının karşılaştırılması a) Pompa İşi, b) Türbin İşi, c) Giren Isı, d) Isıl Verim, e) Ekserji Verimi

Islak akışkanların kaynama noktası sıcaklıklarının diğer tür akışkanlara göre çok düşük olduğu görülmektedir. En düşük kaynama noktası sıcaklığının $-51.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ ile R32’de olduğu belirtilmiştir. Kritik sıcaklıklarda ise R125 ve R32’nin düşük değere sahip olduğu, diğer akışkanların ise birbirine yakın olduğu görülmektedir. Tüm akışkanların $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ’ye karşılık gelen yoğuşma basınçları ile $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ’deki buharlaşma basınçları incelendiğinde diğer tür akışkanlara kıyasla ıslak akışkanların yüksek basınç değerlerine sahip olduğu dikkat çekmektedir. Islak akışkanlar içerisinde en düşük kritik basınç değerine R152a 4.52 MPa ve R134a 4.06 MPa olarak görülmüştür.



Şekil 5. Kuru ve ıslak akışkanların termodinamik performanslarının karşılaştırılması a) Türbin giriş basıncı, b) Buharlaşma Entalpisi (h_{fg}), c) Türbin çıkışı buharın kuruluk derecesi

R123'lü sistemde oluşan basınç farkı R152a'lı sistemde oluşan basınç farkından %75 daha azdır, ayrıca özgül hacmi de %38 daha az olarak tespit edilmiştir. Hem basınç farkının hem de özgül hacminin düşük olmasından dolayı R123'lü sistemin pompa işi R152a'lı sistemden %85 daha az bulunmuştur. R1234ze'li sistemde de yüksek basınç farkı görülmesine rağmen yine de R152a'lı sistemden %13 daha az bir basınç farkına sahiptir. Ayrıca özgül hacmi de %22 daha azdır. Bundan dolayı R1234ze'li sistemde R152a'lı sistemden %32 daha düşük pompa işi tespit edilmiştir.

Bu çalışmada Organik Rankine Çevrimi'nde akışkan seçiminin sistem performansındaki önemi belirtilmiş olup; farklı türden akışkanların çevresel ve termodinamik özellikleri belirlenen performans parametreleri ile karşılaştırılmışlardır.

KAYNAKÇA (REFERENCES)

- [1] H. Wang, H. Li, L. Wang, X. Bu, Thermodynamic Analysis of Organic Rankine Cycle with Hydrofluoroethers as Working Fluids, *Energy Procedia*. 105 (2017) 1889–1894. doi:10.1016/j.egypro.2017.03.554.
- [2] A. Uusitalo, J. Honkatukia, T. Turunen-Saaresti, A. Grönman, Thermodynamic evaluation on the effect of working fluid type and fluids critical properties on design and performance of Organic Rankine Cycles, *Journal of Cleaner Production*. 188 (2018) 253–263. doi:10.1016/j.jclepro.2018.03.228.
- [3] A. Ergün, Organik Rankine Çevrimi Prensibine Göre Çalışan Bir Jeotermal Elektrik Santralinin

- Termoekonomik Analizi, Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük Üniversitesi, Karabük, Türkiye, 2014.
- [4] M. Eyidoğan, Organik Rankine Çevrimli Güç Üretim Sisteminin Enerji ve Ekserji Analizi, Doktora Tezi, Karabük Üniversitesi, Karabük, Türkiye, 2014.
- [5] A. Giuffrida, A theoretical study on the performance of a scroll expander in an organic Rankine cycle with hydrofluoroolefins (HFOs) in place of R245fa, *Energy*. 161 (2018) 1172–1180. doi:10.1016/j.energy.2018.07.146.
- [6] J. Yang, Z. Sun, B. Yu, J. Chen, Experimental comparison and optimization guidance of R1233zd(E) as a drop-in replacement to R245fa for organic Rankine cycle application, *Applied Thermal Engineering*. 141 (2018) 10–19. doi:10.1016/j.applthermaleng.2018.05.105.
- [7] A. Behzadi, E. Gholamian, E. Houshfar, A. Habibollahzade, Multi-objective optimization and exergoeconomic analysis of waste heat recovery from Tehran's waste-to-energy plant integrated with an ORC unit, *Energy*. 160 (2018) 1055–1068. doi:10.1016/j.energy.2018.07.074.
- [8] A.H. Bademlioglu, R. Yamankaradeniz, O. Kaynakli, Exergy analysis of the organic rankine cycle based on the pinch point temperature difference, *Journal of Thermal Engineering*. 5 (2019) 157–165. doi:10.18186/THERMAL.540149.
- [9] R. Şahin, S. Ata, A. Kahraman, Organik Rankine Çevriminde Farklı Tip Akışkanlarda Türbin Giriş Sıcaklığı ve Basıncının Sistem Bileşenlerindeki Tersinmezlik Değerlerine Etkisinin Belirlenmesi Determination of Impact of Turbine Input Temperature and Pressure on the Irreversibility Values, *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*. 33 (2018) 225–236.
- [10] H. Xi, M.J. Li, C. Xu, Y.L. He, Parametric optimization of regenerative organic Rankine cycle (ORC) for low grade waste heat recovery using genetic algorithm, *Energy*. 58 (2013) 473–482. doi:10.1016/j.energy.2013.06.039.
- [11] K. Rahbar, S. Mahmoud, R.K. Al-Dadah, N. Moazami, Parametric analysis and optimization of a small-scale radial turbine for Organic Rankine Cycle, *Energy*. 83 (2015) 696–711. doi:10.1016/j.energy.2015.02.079.
- [12] J. Sarkar, Generalized pinch point design method of subcritical-supercritical organic Rankine cycle for maximum heat recovery, *Energy*. 143 (2018) 141–150. doi:10.1016/j.energy.2017.10.057.
- [13] J. Li, Q. Liu, Z. Ge, Y. Duan, Z. Yang, Thermodynamic performance analyses and optimization of subcritical and transcritical organic Rankine cycles using R1234ze(E) for 100–200 °C heat sources, *Energy Conversion and Management*. 149 (2017) 140–154. doi:10.1016/j.enconman.2017.06.060.
- [14] Q. Zhu, Z. Sun, J. Zhou, Performance analysis of organic rankine cycles using different working fluids, *Thermal Science*. 19 (2015) 179–191. doi:10.2298/TSCI120318014Z.
- [15] F. Vélez, J.J. Segovia, M.C. Martín, G. Antolín, F. Chejne, A. Quijano, Comparative study of working fluids for a Rankine cycle operating at low temperature, *Fuel Processing Technology*. 103 (2012) 71–77. doi:10.1016/j.fuproc.2011.09.017.
- [16] A. Javanshir, N. Sarunac, Thermodynamic analysis of a simple Organic Rankine Cycle, *Energy*. 118 (2017) 85–96. doi:10.1016/j.energy.2016.12.019.
- [17] J. Bao, L. Zhao, A review of working fluid and expander selections for organic Rankine cycle, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 24 (2013) 325–342. doi:10.1016/j.rser.2013.03.040.
- [18] J.M. Calm, G.C. Hourahan, Refrigerant data update, *HPAC Heating, Piping, AirConditioning Engineering*. 79 (2007) 50–64.