



**Trakya Üniversitesi
Mühendislik Bilimleri Dergisi**

Cilt: 23 Sayı: 1 Haziran 2022

**TRAKYA
UNIVERSITY
JOURNAL OF
ENGINEERING
SCIENCES**

Volume: 23 Number: 1 June 2022

Trakya Univ J Eng Sci

<http://dergipark.gov.tr/tujes>
tujes@trakya.edu.tr

ISSN 2147-0308

**Trakya Üniversitesi
Mühendislik Bilimleri Dergisi**

Cilt: 23

Sayı: 1

Haziran

2022

**Trakya University
Journal of Engineering Sciences**

Volume: 23

Number: 1

June

2022

Trakya Univ J Eng Sci

<http://dergipark.gov.tr/tujes>
tujes@trakya.edu.tr

ISSN 2147-0308

Dergi Sahibi / Owner

Trakya Üniversitesi Rektörlüğü, Fen Bilimleri Enstitüsü Adına
On behalf of Trakya University Rectorship, Graduate School of Natural and Applied Sciences
Prof. Dr. Hüseyin Rıza Ferhat KARABULUT

Yayın Kurulu Üyeleri / Editorial Board Members

Baş Editör / Editor-in-Chief

Doç. Dr. Önder AYER Makine Mühendisliği Trakya Üniversitesi

Alan Editörleri / Co-Editors

Prof. Dr. Hacı Ali GÜLEÇ Gıda Mühendisliği Trakya Üniversitesi
Doç. Dr. Esmâ MIHLAYANLAR Mimarlık Trakya Üniversitesi
Doç. Dr. Hasan Faik KARA Mimarlık Trakya Üniversitesi
Doç. Dr. Gökhan KAÇAR Genetik ve Biyomühendislik Trakya Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Selin ARABULAN Mimarlık Trakya Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Altan MESUT Bilgisayar Mühendisliği Trakya Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Emir ÖZTÜRK Bilgisayar Mühendisliği Trakya Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Gökhan KOÇYİĞİT Elektrik-Elektronik Müh. Trakya Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Sezer ULUKAYA Elektrik-Elektronik Müh. Trakya Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Gürkan İRSEL Makine Mühendisliği Trakya Üniversitesi
Dr. Pınar Aydan DEMİRHAN Makine Mühendisliği Trakya Üniversitesi

Danışma Kurulu / Editorial Advisory Board

Prof. Dr. Hüseyin Erol AKATA Makine Mühendisliği İstanbul Aydın Üniversitesi
Prof. Dr. Ayşegül AKDOĞAN EKER Makine Mühendisliği Yıldız Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Burhan ÇUHADAROĞLU Makine Mühendisliği Karadeniz Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Naci GENÇ Elektrik-Elektronik Müh. Yüzüncü Yıl Üniversitesi
Prof. Dr. Özer GÖKTEPE Tekstil Mühendisliği Namık Kemal Üniversitesi
Prof. Dr. Türkan GÖKSAL ÖZBALTA İnşaat Mühendisliği Ege Üniversitesi
Prof. Dr. M. Bahattin TANYOLAÇ Biyo-mühendislik Ege Üniversitesi
Prof. Dr. Pelin ONSEKİZOĞLU BAĞCI Gıda Mühendisliği Trakya Üniversitesi
Prof. Dr. İsa CAVIDOĞLU Gıda Mühendisliği Yüzüncü Yıl Üniversitesi
Doç. Dr. Yılmaz KALKAN Elektrik-Elektronik Müh. Adnan Menderes Üniversitesi
Doç. Dr. Cemil ÖZYAZGAN İnşaat Mühendisliği Kırklareli Üniversitesi
Doç. Dr. Orhan ARKOÇ Jeoloji Mühendisliği Kırklareli Üniversitesi
Doç. Dr. Timur KAPROL Mimarlık Namık Kemal Üniversitesi
Doç. Dr. Ümit HÜNER Makine Mühendisliği Kırklareli Üniversitesi
Assoc. Prof. Dr. Jiri SOBOTKA Mechanical Engineering Technical University of Liberec
Assoc. Prof. Dr. Regita BENDIKIENE Mechanical Engineering Kaunas University of Technology
Assist. Prof. Dr. Tomasz JACHOWICZ Polymer Processing Lublin University of Technology
Assist. Prof. Dr. Mirosław SZALA Mechanical Engineering Lublin University of Technology
Assist. Prof. Dr. Balazs BOKOR Mechanical Engineering Budapest Univ. of Tech. Econ.
Assist. Prof. Dr. Eldhose IYPE Chemical Engineering BITS Pilani
Dr. Öğr. Üyesi Mustafa ERGEN Mimarlık Siirt Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Hamza F. CARLAK Elektrik-Elektronik Müh. Akdeniz Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Sedat BİNGÖL Makine Mühendisliği Dicle Üniversitesi
Dr. Aslı Günay BULUTSUZ Makine Mühendisliği Yıldız Teknik Üniversitesi

Dizgi / Design

Dr. Öğr. Üyesi Gökhan KOÇYİĞİT

İletişim Bilgisi / Contact Information

Address : Trakya Üniversitesi, Enstitüler Binası, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balkan Yerleşkesi, 22030, Edirne / TÜRKİYE
Web site : <http://dergipark.gov.tr/tujes> E-mail : tujes@trakya.edu.tr
Tel : +90 284 2358230 Fax : +90 284 2358237

Baskı / Publisher

Trakya Üniversitesi Matbaa Tesisleri / Trakya University Publishing Centre

İÇİNDEKİLER / CONTENTS

ARAŞTIRMA MAKALELERİ / RESEARCH ARTICLES

COOLING LOAD REDUCTION WITH TRANSPIRED SOLAR COLLECTORS

Balázs BOKOR, Hacer AKHAN, Doğan ERYENER, László KAJTÁR 1-10

SANAYİDE ENERJİ YÖNETİMİ: POMPA VE FAN SİSTEMLERİNDE VERİMLİLİK ARTIRICI UYGULAMALAR

Energy Management in Industry: Efficiency Improvement Applications in Pump and Fan Systems

Hacer AKHAN 11-23

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE EFFECT OF DESIGN CRITERIA ON POROSITY IN HPDC OF AISi9Cu3(Fe) ALLOY

AISi9Cu3(Fe) Alaşımının Yüksek Basıncılı Dökümünde Tasarım Kriterlerinin Poroziteye Etkisinin Teorik Ve Deneysel Olarak Araştırılması

M. Tahir ALTINBALIK, F. Atahan YÜKSEL 25-36

VIDEO DOSYALARI ÜZERİNDE LSB YÖNTEMİYLE BİLGİ GİZLEME İŞLEMİNİN SIRALI VEYA RASTGELE YAPILMASININ GÜVENLİĞE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Investigation of the Effects of Sequential or Random Hiding of Information on Video Files Using the LSB Method on Security

Egemen TEKKANAT, Andaç Şahin MESUT 37-49

COOLING LOAD REDUCTION WITH TRANSPIRED SOLAR COLLECTORS

Balázs BOKOR¹ , Hacer AKHAN^{2*} , Doğan ERYENER² , László KAJTÁR¹ 

¹Budapest University of Technology and Economics, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Building Service and Process Engineering, Budapest/Hungary

²Trakya University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Edirne/Turkey

Cite this article as:

Bokor, B., Akhan, H., Eryener, D., Kajtar, L. (2022). Cooling Load Reduction with Transpired Solar Collectors, *Trakya University Journal of Engineering Sciences*, 23(1), 1-10.

Highlights

- Cooling load reduction
- The passive cooling potential of transpired solar collector
- At night, the perforated plate acts as a radiating shield

Article Info	Abstract
Article History: Received: December 22, 2022 Accepted: March 17, 2022	<p>When considering energy reduction issues of the building sector, one cannot overlook the importance of cooling load reduction. Depending on a country's primary energy conversion factor, producing one unit of cooling energy with a chiller can require three times as much primary energy than producing one unit of heating energy with a boiler. A remarkable amount of the cooling load of a building reaches the interior through the roof, as roofs can be as hot as 70 °C under strong solar radiation. Roof ventilation with double-layer structures offers a reliable temperature reduction between the solar exposed upper layer and the lower one, which is the actual building roof. The transpired solar collector (TSC) is a proven technology for solar air heating with numerous installed and successfully operated systems around the world. This paper reflects on its passive cooling potential, when the perforated metal plate absorber is installed on a building's roof. At night, the perforated plate acts as a radiating shield, which loses heat towards the cold sky. The perforated plate cools below ambient temperature and cools transpiring outdoor air which is later used for nocturnal ventilation of the building. However, the predicted cooling energy during an analysis of the radiant cooling strongly depends on the sky temperature model chosen. Different models of sky temperature are compared in their result on the longwave radiant heat flux towards the sky. The comparison has been carried out for four cities with different climate. Results reflect on a novel application of the transpired solar collector, which therefore can be used for the reduction of building energy consumption over the entire year.</p>
Keywords: Transpired solar collector; Roof ventilation; Nocturnal radiation; Passive cooling; Solar cooling load reduction.	

1. Introduction

As the building sector is responsible for 40-50 % of the energy consumption in the EU (Kolokotroni, Aronis, 1999), in order to accomplish the 20/20/20 targets of the Energy Efficiency Plan of 2011 (www.eea.europa.eu/highlights/eu-achieves-20-20-20), it is crucially important to apply energy supply systems which use renewable sources of energy. Transpired solar collectors are economical systems to include renewable energy supply into the heating system of a building.

However, the production of a unit of cooling energy can require multiple amounts of the production of one unit of heating energy, depending on the primary energy conversion factor of the country. This makes cooling demand reduction even more important than the reduction of heating demand. A vast proportion of building cooling load arrives through the roof. Ventilated double shell roofs can efficiently reduce the temperature of the ceiling and thus the cooling load. Al-Obaidi et al. (2014) designed an innovative roofing system to reduce heat gain using reflective and radiative pigment technique, as well as ventilation. Results show that the developed roofing system was able to reduce the indoor air temperature compared with conventional roofing system by approximately 2.1°C under daylight condition. Roslan et al. (2016) wrote that “it is natural to expect that an unvented roofing system would affect the energy consumption of a house”. Ciampi et al. (2005) investigated the convenience of using ventilated roofs for the reduction in summer thermal loads, taking into consideration the case of roofs with small-sized-thickness duct in which the airflow is laminar (microventilation). The obtained results show that an energy saving, even exceeding the 30%, can be achieved by using ventilated roofs in summer, compared to the same non-ventilated structure. Puangsombut et al. (2007) carried out experimental investigation on the natural ventilation flow rate and heat gain reduction in an attic using an

open-ended inclined rectangular channel with radiant barrier. When compared to a conventional roof solar configuration with gypsum board on the lower part, it was observed that the use of radiant barrier increased convective heat transfer and airflow rate by about 40–50%, thereby increasing heat transfer reduction through the lower plate by about 50%. Results show that extensive research have been made on the cooling load reduction with ventilated roofs. However, none of them investigated roof ventilation with the commercially available TSC.

2. Transpired Solar Collectors

Transpired solar collectors are commonly used systems for solar air heating in North America and they are getting more widespread in Europe, too. Primary energy can be reduced with their application in every building with high fresh air demand and enough space on the façade for their installation. Mainly large halls like commercial and industrial buildings meet these criteria, as both manufacturing processes and the storage of certain goods can require ventilation with fresh air. (Hollick J, 1994)

2.1. Construction and Operational Principle

The potential of the transpired solar collector lays in its simple construction and thus reliable and almost maintenance-free operation. The absorber, which is made of conventional building cladding material, can be included in the in the architectural conception of new buildings, but it can be added to existing facades, too. The trapezoidal, perforated metal shield is mounted in 15-20 cm distance onto the building's original façade, creating an air gap, or plenum. This is closed from the sides, so air can enter it only through the perforations of the absorber plate.

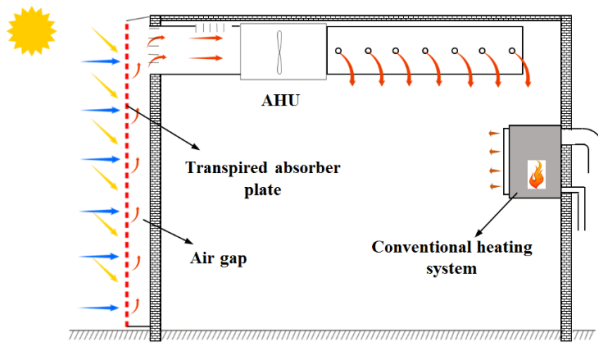


Figure 1. TSC construction and operational principle

As Figure 1 shows, the air passes the absorber as AHU fans withdraw fresh air from the plenum. The transpiration of the absorber ensures the transfer of the solar heat to the fresh air. The simple construction and maintenance free operation of the TSC ensures low payback periods such as 2-10 years (Hall et al., 2011), which is remarkably low among solar thermal systems.

2.2. Physics of Solar Air Heating with TSC

Seeing Figure 1, one could think that in the lack of transparent glazing, the TSC has remarkable thermal losses due to convection to the exterior. According to Kutscher et al. (1993), assuming homogenous suction on the surface the absorber, one can state that the suction stabilizes the boundary layers on the external side of the absorber, reducing the effect of convective losses solely to the collector edges. This means that for large collector surfaces the convective losses are negligible and wind losses remain small, too. Kutscher et al. (1993) describe that to ensure little impact of wind:

- the suction face velocity should be preferably 0.04-0.05 m/s, but at least 0.02 m/s,
- at least 25 Pa pressure drop is to be obtained across the perforated plate, and
- the wall should be designed to have uniform flow through itself.

The flow rate through the surface of the TSC has to be kept between 18-180 m³/(h·m²) (RETScreen International, 1997-2005) to ensure stable operation.

Three air heating strategies can be defined by choosing the appropriate airflow:

- high temperature rise in the range of 18-54 m³/(h·m²)
- standard operation in the range of 54-108 m³/(h·m²)
- high air volume in the range of 108-180 m³/(h·m²)

High-flow TSC systems perform much better than low flow ones, as the efficiency can reach its highest values when high flow is cooling the absorber, utilising the most of its heat, reducing all kinds of thermal losses. In Figure 2 one can see that for a given wind speed the collector efficiency only depends on the air flow rate, which underlines the negligible impact of convective losses depending on ambient temperature.

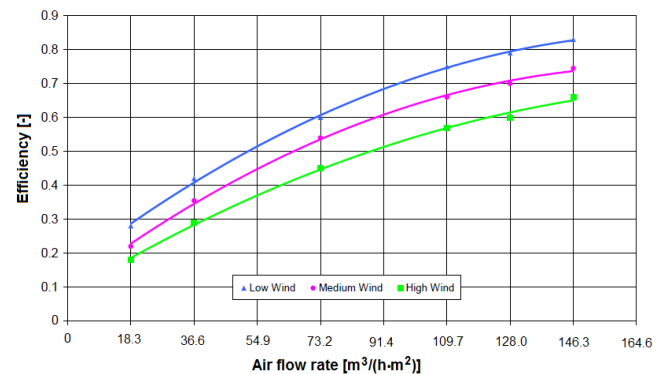


Figure 2. TSC efficiency as a function of the air flow rate (<http://sahwia.org>)

The decreasing collector efficiency in low flow operation defines a minimum flow rate for the solar air heating operation of the TSC. Under 18 m³/(h·m²) the uniform transpiration of the absorber plate cannot be ensured. Natural ventilation through the perforated plate and in the plenum creates an outflow in higher areas of the absorber. This is absolutely undesirable, as this collector area does not take place in the solar air heating process anymore. However, this phenomenon can be made useful when applying the TSC on a building roof.

3. Roof Ventilation with TSC

The installation of transpired solar collectors on a building roof ensures new benefits of the system. Other than one would first think, the absorbent surface which reaches high temperatures during hot and sunny summer days does not increase the cooling load of the building. The natural airflow described above comes to be too, if the collector is not installed for solar air heating purposes, but simply as a ventilated, double roof structure.

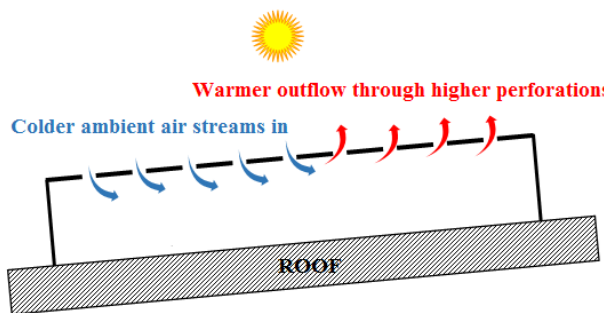


Figure 3. Natural ventilation in a roof mounted TSC

The absorber plate, which reaches high temperatures, evokes the natural airflow in the air gap between the absorber and the original roof. The air in the cavity rises driven by buoyancy the force, leaves through upper perforations and at the same time colder ambient air streams into the air gap beneath. The described process is visualized in Figure 3. The continuous ventilation thermally decouples the absorber plate from the back plate which stands for the actual building roof. The TSC reduces thermal load from the building roof this way, which is proven by the experimental research carried out by Bokor et al. (2017).

An experimental setup of 5 m² TSC with adjustable tilt of 0-10-20-30-40° (see Figure 4) was used to investigate the cooling load reduction capacity of the TSC. Measurements were carried out in summer 2016 on the campus of Trakya University, Engineering Faculty, Edirne, Turkey. Results show that the TSC is capable to reduce heat gain between the absorber plate

and the back plate to 4-12 % of the incoming solar radiation in average.



Figure 4. The 5 m² experimental setup used for roof ventilation measurements

4. Nocturnal Radiant Air Cooling with TSC

Several studies (Artmann et al. 2007, Kolokotroni et al., 1998, Blondeau, et al., 1997) have emerged about cooling load reduction by nocturnal ventilation of buildings. By natural or mechanical ventilation buildings are supplied by cool ambient air during the night, which aims to reduce the temperature of the building mass. For this, a remarkable temperature difference is necessary between the building mass and the ambient air. Considering the climatic conditions in Europe, one can state that in regions with warm climates such as the Mediterranean basin where the higher cooling peaks come to be, it is less likely to find cool enough nocturnal ambient temperatures.

The efficiency of the cooling load reduction with nighttime ventilation can be increased if the ventilation air is cooled below ambient temperature using any passive cooling method. Sky facing transpired solar collectors can be used as radiating shields which cool down below ambient temperature. Hollick (2012) carried out night cooling tests with commercially

available TSC absorbers and obtained results which show that the plate “can be approximately 10 °C cooler than ambient temperature in the Great Lakes region”, cooling ambient air “by as much as 4.7 °C below” its original temperature.

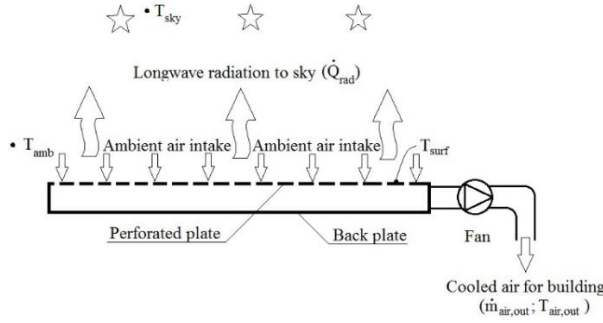


Figure 5. Physical model of nocturnal radiative air cooling with a transpired solar collector

Figure 5 shows the physical model of the nocturnal radiant air-cooling method using TSC. It is to be noted that unless the absorber surface of a solar collector has been selectively coated, not only its absorptivity (α), but also its emissivity (ϵ) value is high (Hall and Blower, 2016). In the current investigation $\epsilon = 0.77$ was considered, which is common for commercially available transpired solar collectors.

The longwave radiant heat transfer between the collector surface and the cold night sky can be calculated using eq. (1) as given by Kumar and Leon (2007).

$$\dot{Q}_{LW} = \epsilon_{col} \cdot \sigma_{SB} \cdot A_{col} \cdot (T_{col}^4 - F_{cs} \cdot T_{sky}^4 - F_{cg} \cdot T_{gnd}^4) \quad (1)$$

Here T_{col} is the collector temperature in K, T_{sky} is the equivalent sky temperature in K, T_{gnd} is the ground temperature in K, while F_{cs} and F_{cg} are view factors given by eq. (2)-(3).

The collector-sky view factor is:

$$F_{cs} = \frac{1 + \cos\gamma}{2} \quad (2)$$

Here γ stands for the collector tilt.

The collector-ground view factor is:

$$F_{cg} = 1 - F_{cs} \quad (3)$$

For the determination of the equivalent sky temperature several models are available. In the following section it is shown how different sky temperature models influence the calculated longwave radiant heat flux, which powers the nocturnal air-cooling process of a TSC.

4.1. Clear Sky Temperature Calculation Models

The general equation of the clear sky temperature (eq. 4.) defines it as a function of the ambient air temperature in K (T_{amb}) and the clear sky emissivity (ϵ_{sky}).

$$T_{sky} = T_{amb} \cdot \epsilon_{sky}^{0.25} \quad (4)$$

For the clear sky emissivity several studies have delivered correlations. Pioneering studies of Angstrom and Brunt delivered correlations which contain empirical coefficients which depend on the geographical location (Vall and Castell, 2017). Swinbank (1963) developed a correlation which delivers the clear sky temperature solely depending on the ambient temperature.

$$T_{sky} = 0.0552 \cdot T_{amb}^{1.5} \quad (5)$$

Hatfield et al. (1983) stated in their study that models which do not consider the effect of humidity only that of the ambient temperature do not estimate the sky emissivity in a precise manner.

Bliss (1961) developed a correlation (eq. 6.) which is based on theoretical concepts of gas emissivity and empirical correlations of gas properties (Vall and Castell, 2017).

$$\epsilon_{sky} = 0.8004 + 0.00396 \cdot t_{dew} \quad (6)$$

Clark (1981) developed the correlation below based on dew point temperature too:

$$\epsilon_{sky} = 0.787 + 0.0028 \cdot t_{dew} \quad (7)$$

Berdahl and Fromberg (1982) developed correlations for both day and night based on measurements in three

cities in the USA. Eq. (8) predicts the nighttime sky emissivity.

$$\varepsilon_{sky,night} = 0.741 + 0.0062 \cdot t_{dew} \quad (8)$$

Berger (1984) carried out measurements in Carpentras, France and laid down all-day and nocturnal correlations from which here the latter is considered as eq. (9):

$$\varepsilon_{sky,night} = 0.770 + 0.0038 \cdot t_{dew} \quad (9)$$

Based on measurements on the Negev Highlands in Israel, Tang et al. proposed the following formula:

$$\varepsilon_{sky} = 0.754 + 0.0044 \cdot t_{dew} \quad (10)$$

Berdahl and Fromberg (1982) derived the sky temperature from the ambient temperature T_{amb} in K, the dew-point temperature in °C and the hour from midnight τ in eq. (11):

$$T_{sky} = T_{amb} \cdot [0.711 + 0.0056 \cdot t_{dew} + 0.000073 \cdot t_{dew}^2 + 0.013 \cdot \cos(15\tau)]^{1/4} \quad (11)$$

To see the effect of the sky temperature/emissivity model choice, a comparison has been made between for cities with different climates. The meteorological data has been obtained from RETScreen 4 Clean Energy Project Analysis Software, as well as (www.weatherbase.com/weather). The locations chosen are a) Bamako, Mali, b) Tunis, Tunisia, c) Milan, Italy and d) Hamburg, Germany.

Bamako, Mali has tropical savannah climate where average daytime temperatures range between 24-30°C. There is a yearly swing in relative humidity marking a dry season from November to April with almost no precipitation and a rainy season From July to September. As seen in Figure 6a) there is cooling season in the entire year. The lower sky temperatures in the winter months are the result of the dry season when the low amount of atmospheric humidity enables sky temperatures to reach lower values. Figure Figure 7a) shows the calculated sky temperatures. It can be seen that the Swinbank equation – the only one which does not consider atmospheric humidity – delivers the

highest values in the dry season and the lowest ones in the rainy one. On the other hand, it can be stated that all other models which incorporate humidity, result in colder skies when the atmosphere is dry and warmer ones in the humid rainy season.

Figure 8 shows the calculated longwave radiation from a horizontal surface of ambient temperature using eq. (1). As the plate cools down below ambient as a result of the radiative heat transfer, these values get smaller. However, Figure 8 is still suitable for demonstrating the yearly course of the longwave heat flux calculated using different methods. It can be observed on Figure 8a) that for Bamako the Swinbank equation predicts remarkably less radiant heat flux to the sky for the dry and more for the humid season. The yearly course of the other models is similar, however there are significant differences between the results which reflects on the importance of choosing the suitable model. This can be found by a comparative analysis with measurement results only. Bamako has a visibly different course of longwave flux compared to the other three cities, which is due to the high changes in humidity in the Malian capital. For the dry season, the model of Martin and Berdahl predicts 50 % of longwave flux of that of the dry season. In other cities the yearly course of the LW profiles is more balanced.

Tunis, Tunisia has hot summer Mediterranean climate with hot and dry summers and mild winters. As seen in Figure 6b) the cooling season in Tunis still expands to the whole year, however in the winter months the cooling degree days reach only a tenth of the peak values in summer. The different models for the clear sky temperature deliver much more correlating values for Tunis than for Mali, this is due to the smaller change in relative humidity over the year. As Figure 8b) shows balanced values for the yearly course of longwave radiation with the highest values in the winter time, one can state that nocturnal radiant cooling with TSC could possibly take a remarkable share in the cooling energy

demand in winter and in the transitional period, but could also reduce peaks in summer.

Milan has humid subtropical climate with hot summers and foggy winters. The cooling season lasts from April to October. As the sky temperature depends on the ambient temperature, it can be seen that the locations with colder ambient temperatures consequently have lower night sky temperatures.

In Hamburg there is oceanic climate due to the vicinity of the North and Baltic Seas. Winters are cold, but snow is rare. Summers are mild, the cooling season restricts only to a period from May to September with low peaks. The theoretically calculated longwave radiant heat flux towards the sky can be significantly reduced by the often-thick cloud cover, which is not taken into consideration in the present study.

The considered models result in remarkable differences in longwave radiation for the examined locations. For Tunis, Milan and Hamburg the lowest heat flux is resulted by the model of Bliss. The highest one remains Swinbank's solution for Tunis, Milan and Hamburg. However, the difference between minimum and maximum is remarkable: for Hamburg the average of the results delivered by Bliss' model is 2/3 of the results of the Swinbank equation.

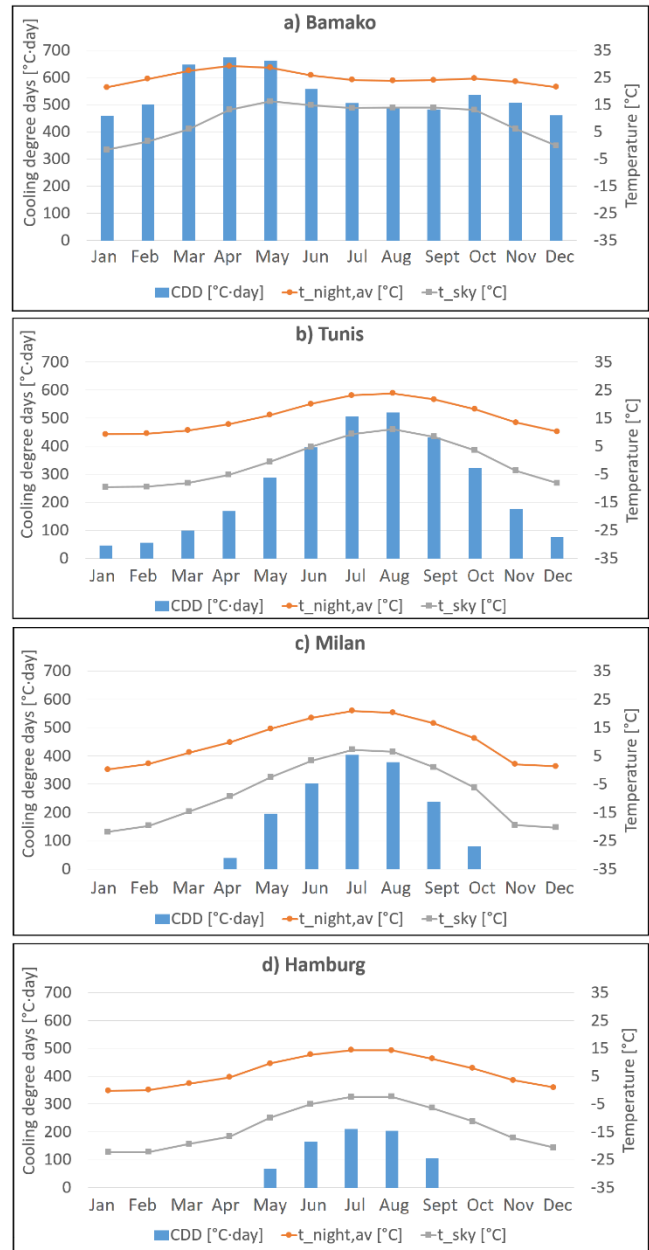


Figure 6. Monthly values of cooling degree days, nocturnal average temperature and sky temperature for Bamako, Tunis, Milan and Hamburg

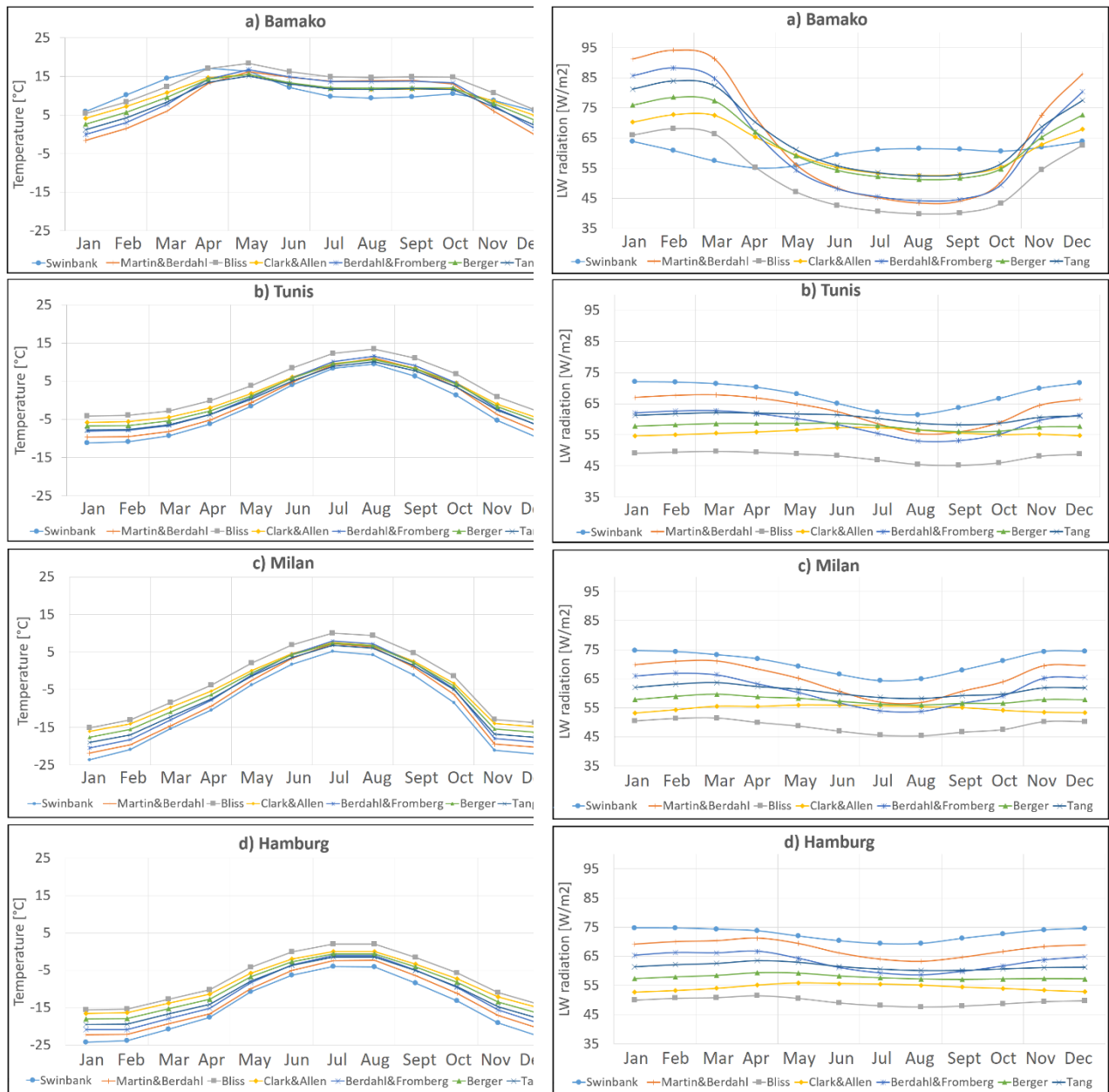


Figure 7. Monthly average nighttime clear sky temperatures for Bamako, Tunis Milan and Hamburg calculated according to the named correlations

Figure 8. The effect of different T_{sky} models on the monthly average LW radiation from a horizontal plate of ambient temperature.

5. Conclusion

Transpired solar collectors are reliable solar thermal systems, which can reduce the primary energy consumption of a building over the whole year. Their simple construction and maintenance-free operation result in short payback periods. They have been successfully applied for solar air heating since the early

1990s, but the current research reflects on their ability to reduce the cooling load of a building in summertime.

Experimental and theoretical research has shown that the transpired solar collector is capable to reduce heat gain between the absorber plate and the back plate to 4-12 % of the incoming solar radiation in average.

Different clear sky emissivity and temperature models have been compared in their effect on the longwave radiant heat flux towards the sky from a horizontal plate of ambient temperature. It must be noted that the applied models calculate clear sky emissivity and temperature. Occasional cloud cover significantly reduces the longwave radiant heat flow towards the sky. However, the effect of cloud coverage is out of the scope of the current investigation.

Although the sky temperatures are often close and vary by a few degrees in the summer months as seen on Figure 7 b) c) and d), the changes in longwave radiation become remarkable between results delivered by the different models.

It can be seen that the Swinbank equation does not always deliver the lowest sky temperatures, when the atmosphere is extremely dry like during the dry season in Bamako, it resulted in the highest sky temperatures.

Based on the current investigation it can be concluded that the longwave radiation to the sky reaches the highest potential during the dry season in Mali which has the hottest climate of the four examined locations. This result highlights on the need of further research to investigate the possibly quick payback of the low budget TSC alongside with its passive cooling fraction in the entire cooling demand.

6. Acknowledgements

This research has been supported by Trakya University Engineering Faculty and the location of experimental prototype at the faculty campus is provided by Trakya University Engineering Faculty.

The research reported in this paper and carried out at BME has been supported by the NRDI Fund (TKP2020 NC, Grant No. BME-NCS) based on the charter of bolster issued by the NRDI Office under the auspices of the Ministry for Innovation and Technology.

The international cooperation between Trakya University and Budapest University of Technology and Economics has been funded by the “National Talent Program” of the Hungarian Human Capacities Fund. For the support that made a research semester at Trakya University possible, author B. Bokor would thereby like to give thanks to the Hungarian Ministry of Human Capacities.



MINISTRY
OF HUMAN CAPACITIES

References

- <https://www.eea.europa.eu/highlights/eu-achieves-20-20-20>
- Al-Obaidi KM, Ismail M, Abdul Rahman AM, (2014), Design and performance of a novel innovative roofing system for tropical landed houses. *Energy Conversion and Management*, 85 pp. 488-504.
- Artmann N, Manz H, Heiselberg P, (2007), Climatic Potential for Passive Cooling of Buildings by Night-time Ventilation in Europe. *Applied Energy*, 84 187-201
- Artmann N, Manz H, Heiselberg P, (2008), Parameter Study on Performance of Building Cooling by Night-time Ventilation. *Renewable Energy*, 33 2589-2598
- Berdahl P, Fromberg R, (1982), The thermal radiance of clear skies. *Solar Energy*, 29 299-314.
- Berger X, Buriot D, Garnier F, (1984), About the equivalent radiative temperature for clear skies, DOI:10.1016/0038-092X(84)90247-0
- Bliss RA, (1961), Atmospheric radiation near the surface of the ground. *Solar Energy*, 5 103.
- Blondeau P., Spérandio M., Allard F., (1997), Night Ventilation for Building Cooling in Summer. *Solar Energy Vol. 61. No. 5. pp. 327-335.*

- Bokor B, Akhan H, Eryener D, Kajtár L., (2017), Theoretical and experimental analysis on the passive cooling effect of transpired solar collectors. *Energy and Buildings* 156 pp. 109-120.
- Ciampi M., Leccese F., Tuoni G., (2005), Energy analysis of ventilated and microventilated roofs. *Solar Energy*, 79 pp 183-192.
- Clark G, (1981), Passive/Hybrid comfort cooling by thermal radiation. Passive/Hybrid Cooling Conference, Miami.
- Duffie JA, Beckman WA, (2013), Solar Engineering of Thermal Processes. 4th edition. *John Wiley & Sons. New Jersey*.
- Hall R, Blower J., (2016), Low emissivity transpired solar collectors. *Energy Procedia*, 91 56-63.
- Hall R, Wang X, Ogden R, Elghali L., (2011), Transpired Solar Collectors for Ventilation Air Heating. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers* pp 101-110.
- Hartfield JL, Reginato RJ, Idso SB, (1983), Comparison of long-wave radiation calculation methods over the United States. *Water Resour Res.*, 19,285.
- Hollick J., (2012), Nocturnal radiation cooling tests. *Energy Procedia*, 30 930-936.
- Hollick J., (1994), Unglazed Solar Wall Air Heaters. *Renewable Energy*, 5, 415-421
- Kolokotroni M, Aronis A., (1999), Cooling-energy Reduction in Air-conditioned Offices by Using Night Ventilation. *Applied Energy*, 63 241-253
- Kolokotroni M, Webb BC, Hayes D., (1998), Summer Cooling with Night Ventilation for Office Buildings in Moderate Climates. *Energy and Buildings*, 27 231-237
- Mahowald, R (2009). A Brief History of SaaS (Vol.50). Kumar S, Leon MA., (2007), Mathematical Modeling and Thermal Performance Analysis of Unglazed Transpired Solar Collectors. *Solar Energy*, 81 62-75.
- Kutscher CF, Christensen CB, Barker GM., (1993), Unglazed Transpired Solar Collectors: Heat Loss Theory. *Journal of Solar Energy Engineering*, Vol. 115, August, pp. 182-188.
- Puangsoambut W, Hirunlabh J, Khedari J, Zeghmati B, Win MM., (2007), Enhancement of natural ventilation rate and attic heat gain reduction of roof solar collector using radiant barrier. *Building and Environment* 42 pp. 2218-2226.
- RETScreen International, (1997-2005), Clean Energy Decision Support Centre: RETScreen Software Online User Manual, Solar Air Heating Project Model. *Ministry of Natural Resources, Canada, ISBN: 0-662-39636-7*
- Roslan Q, Ibrahim SH, Affandi R, Nawi MNM, Baharun A., (2016), A literature review on the improvement strategies of passive design for the roofing system of the modern house in a hot and humid climate region. *Frontiers of Architectural Research*, 5 pp 126-133.
- Swinbank WC., (1963), Long-wave radiation from clear skies. *Q J R Meteorol Soc.*, 89 339-348.
- <http://sahwia.org/> (Last downloaded: 8/02/2018)
- <https://www.weatherbase.com/weather/weather.php?s=19216&cityname=Bamako-Mali>
- <https://www.weatherbase.com/weather/weather.php?s=605816&cityname=Tunis-Tunisia>
- <https://www.weatherbase.com/weather/weather.php?s=66061&cityname=Milan-Italy>
- <https://www.weatherbase.com/weather/weather.php?s=74101&cityname=Hamburg-Germany>

SANAYİDE ENERJİ YÖNETİMİ: POMPA VE FAN SİSTEMLERİNDE VERİMLİLİK ARTIRICI UYGULAMALAR

Hacer AKHAN^{ID}

Trakya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, Ahmet Karadeniz Yerleşkesi, Edirne 22030, Türkiye

Makale Künye Bilgisi:

Akhan, H. (2022). Sanayide Enerji Yönetimi: Pompa ve Fan Sistemlerinde Verimlilik Artırıcı Uygulamalar, *Trakya Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 23(1), 11-23.

Öne Çıkanlar

- Pompa ve fan sistemlerinde verimlilik artırıcı uygulamalar
- Pompa ve fan sistemlerinde frekans invertör kullanılarak %60 enerji tasarrufu sağlanmıştır
- Pompa debisini büyük seçip pompayı düşük debide çalıştırmak veya çıkış vanasını kısmak enerji tasarrufu sağlamamaktadır.

Makale Bilgileri

Öz

Makale Tarihçesi:

Geliş:
21 Aralık 2022
Kabul:
21 Şubat 2022

Anahtar Kelimeler:

Enerji yönetimi;
Enerji verimliliği;
Verimlilik artırıcı
proje;
Frekans inverter;
Değişken hızlı
sürücü.

Enerji yönetimi, enerji kaynaklarının ve enerjinin verimli ve tasarruflu kullanılmasını sağlamak üzere yürütülen eğitim, enerji etüdü, ölçüm, izleme, planlama ve uygulama faaliyetlerini kapsamaktadır. Bu çalışmanın amacı, sanayide pompa ve fan sistemlerinde enerji verimliliğini artırmaya yönelik enerji yönetimi uygulamalarını göstermek ve analiz etmektir. Deneylerde, hangi koşullarda pompa ve fanların verimli kullanılabileceğinin tespiti için çeşitli varyasyonlar yapılmıştır. Pompa debisini büyük seçip pompayı düşük debide çalıştırmak veya çıkış vanasını kısmak tasarruf sağlamamaktadır. Çalışmada ele alınan başlıca enerji verimliliği uygulamaları, kalite ve performansı düşürmeden tüketilen enerji miktarının en aza indirilmesi için pompalarda ve fanlarda frekans invertör kullanımıdır. Analiz sonucunda enerji yönetimi ve enerji verimliliği uygulamaları ile, değişken debili fan ve pompa sistemlerinde frekans invertör kullanılarak %60 enerji tasarrufu sağlanmıştır. Çalışmanın literatüre temel katkısı, frekans invertör kullanımı ile enerji atıklarının, kayıpların ve verimsizliklerin azaltılmasının vurgulanmasıdır.

ENERGY MANAGEMENT IN INDUSTRY: EFFICIENCY IMPROVEMENT APPLICATIONS IN PUMP AND FAN SYSTEMS

Article Info

Abstract

Article Info:

Received:
December 21, 2022
Accepted:
February 21, 2022

Energy management includes training, energy audit, measurement, monitoring, planning, and implementation activities carried out to ensure efficient and economical use of energy resources and energy. The aim of this study is to demonstrate and analyze energy management practices to increase energy efficiency in pump and fan systems in industries. In the experiments, various variations were made to determine under which

Keywords:

Energy management;
Energy efficiency;
Energy efficiency
improvement project;
Frequency inverter;
Variable speed drive.

conditions pumps and fans could be used efficiently. Selecting the pump flow rate large and operating the pump at low flow rate or throttling the outlet valve does not save energy. The main energy efficiency applications discussed in the study are the use of frequency inverters in pumps and fans to minimize the amount of energy consumed without reducing quality and performance. As a result of this study, with energy management and energy efficiency applications, 60% energy savings were achieved by using frequency inverters in variable flow fan and pump systems. The main contribution of the study to the literature is to emphasize the reduction of energy waste, losses, and inefficiencies with the use of frequency inverters.

1. Giriş

Nüfus artışı, kentsel gelişim ve sanayileşme ile dünya birincil enerji tüketimi de giderek artmaktadır. Enerji tüketiminin artmasına neden olan temel etkenlerin başında nüfus artışı gelmektedir. Yapılan projeksiyonlar 2040 yılında dünya nüfusunun 9 milyara yükseleceğini göstermektedir. Bu durum 1,9 milyar insan için artı enerji arzı sağlanması gerekliliğini ortaya koymaktadır. Elektrik üretimi için kullanılan enerji miktarının 2040 yılına kadar yıllık ortalama %2 olmak üzere %70 oranında artacağı beklenmekte olup bu artış, küresel birincil enerji büyüme oranının %42'sine karşılık gelmektedir (AEO, 2018). Sanayide kullanılan birincil enerji tüketiminde %81 oranında artış öngörülmekte olup bu oran, dünya birincil enerji büyüme oranının %50'sini oluşturmaktadır. Bu noktada sanayide enerji yönetimi ile verimliliğin artışı ve enerji tasarrufu gün geçtikçe daha fazla önem kazanmaktadır.

Enerji yönetimi, enerji kaynaklarının ve enerjinin verimli ve tasarruflu kullanılmasını sağlamak üzere yürütülen eğitim, enerji etüdü, ölçüm, izleme, planlama ve uygulama faaliyetlerini kapsamaktadır. Enerji tasarrufu, yeni teknolojilerin kullanımı ile üretimi, kaliteyi ve performansı düşürmeden, sosyal refahı engellemeden enerji tüketiminin azaltılmasıdır. Enerji verimliliği, enerji kaynaklarının üretimden, iletim- dağıtım ve tüketime kadar tüm aşamalarda en yüksek etkinlikte değerlendirilmesidir. Enerji verimliliği, binalarda yaşam standardı ve hizmet kalitesinin,

endüstriyel işletmelerde ise üretim kalitesi ve miktarının düşüşüne yol açmadan birim hizmet veya ürün miktarı başına enerji tüketiminin azaltılmasıdır. Enerji verimliliğinin amacı, enerjinin etkin kullanılması, israfın önlenmesi, enerji maliyetlerinin ekonomi üzerindeki yükünün hafifletilmesi ve çevrenin korunması için enerji kaynaklarının ve enerjinin kullanımında verimliliğin artırılmasıdır. Temel hedef, birim milli gelir başına tüketilen enerjiyi azaltmaktır. Vizyonu, enerjinin tamamını faydaya dönüştüren bir ülke, kişi başına enerji tüketimi yüksek ve enerji yoğunluğu düşük ülkeler arasında yer almaktır.

Dünyada kullanılan enerjinin; %40'ı binalarda, %32'si ulaşımda ve %28'i sanayide harcanmaktadır (IEA, 2018). Bu noktada sanayide enerjinin verimli kullanılması ve enerji tasarrufu gün geçtikçe daha fazla önem kazanmaktadır. Sanayide enerji tasarrufu makinaları kapatmakla prosesi engellemekle veya durdurmakla yapılamayacağına göre, asıl amacı üretim olan sanayi tesislerinde enerji yönetim sistemi oluşturulur. Çünkü enerji, en düşük tüketim ile son ürünü gerçekleştirmek için iyi şekilde yönetilmeyi bekler. Bir fabrikadaki üretim maliyetleri, ham madde, işçilik, işletme ve enerji maliyetlerinin toplamını içerir. Enerji maliyetleri sanayi sektörünün tipine, kullanılan proseslere, ham maddelere ve imal edilen son ürüne bağlı olarak toplam üretim maliyetlerinin %50' sinin üzerine çıkabilir (EYDN, 2021).

Endüstriyel işletmelerde; enerji etüt çalışması ile belirlenen önlemlerin uygulanması ve enerji tasarruf

potansiyelinin geri kazanılması için hazırlanan projeler Verimlilik Artırıcı Proje (VAP) olarak ifade edilmektedir. VAP endüstriyel işletmelerde enerji atıklarının, kayıpların ve verimsizliklerin giderilmesi için gerekli önlemlerin uygulanması amacıyla hazırlanır. Endüstride enerji yönetimi uygulamaları ile enerjinin verimli kullanılmasını sağlayan başlıca uygulamalar: talep tarafı yönetimi, üretim, iletim, dağıtım tesislerinde ve açık alan aydınlatmalarında verimliliğin artırılması, termik santrallerin rehabilitasyonu ve atık ısısından yararlanılması, alternatif yakıt kullanımının özendirilmesi, enerji verimliliği için yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının artırılması, enerji yoğunluğunun azaltılması, yanma sonucu düşük CO₂ emisyonu çıkaran yakıtlara geçilmesi, yakıt kalitesinin iyileştirilmesi, enerji üretiminde kaynak çeşitliliğine gidilmesi, yakıt kalitesinin iyileştirilmesidir. Verimlilik artırıcı projeler yardımıyla enerji tüketimi azaltılır, enerji tüketiminin azaltılması ile enerjiden kaynaklanan masraflar kontrol altında tutulur ve azalır. Cihaz ve ekipman kullanımı kontrol altında tutulur ve enerji tüketiminin izlenmesi yoluyla performans hakkında bilgi edinilir, israftan kaynaklanan olumsuz çevre etkisi azaltılır, emisyon izleme ve raporlama için sistem hazırlanır ve uygulanır, enerji bilinci ile ilgili olarak toplum içinde saygınlığı artırır.

Enerji yönetimi kavramı ilk defa ikinci dünya savaşı sonrası bir İngiliz bilim adamı tarafından kullanılmıştır. Genelde binalar için kullanılmıştır. 1973 petrol krizinden sonra bu kavram sanayide de kullanılmaya başlamıştır (EYDN, 2021). Bunse ve ark. (2011) üretim alanındaki enerji yönetimini kontrol, izleme ve enerji verimliliğinin iyileştirilmesi gibi faaliyetler olarak tanımlamıştır. Her iki kavram arasında bir ilişkide bulunan Uluslararası Enerji Ajansı (IEA, 2012) tanımı: "Enerji yönetimi, enerji kullanımının sistematik olarak izlenmesini, analizini ve planlanmasını içerir. Enerji yönetim sistemleri arasında enerji yönetimi faaliyetleri, uygulamaları ve süreçleri yer almaktadır". Thollander

ve Palm (2015) "Enerji yönetimi, bir şirketin enerji üzerinde stratejik olarak çalıştığı prosedürler olarak tanımlanabilirken, bir enerji yönetim sistemi bu prosedürleri uygulamak için bir araçtır" olarak tanımlamıştır. Literatür taramasında Schulze ve ark. (2016) enerji yönetiminin "strateji/planlama, uygulama/işletme, kontrol, organizasyon ve kültür"den oluştuğunu tanımlamıştır. Enerji yönetimi; planlama, koordinasyon ve kontrol gibi birbirinden bağımsız olduklarında etkisiz kalabilecek işlevlerin bir araya gelerek oluşturdukları bir bütündür. Sanayide Enerji Yönetimi ise; ürün kalitesinden, güvenlikten veya çevresel tüm koşullardan fedakarlık etmeksizin ve üretimi azaltmaksızın enerjinin verimli kullanımı doğrultusunda yapılandırılmış ve organize edilmiş disiplinli bir çalışmadır. Sanayinin enerjisi verimli kullanma gereksinimi üç zaman diliminde incelenebilir: 1973 Petrol Krizi Sonrası, 1980'lerde yaşanan teknolojik gelişmeler, 1990'larda gelişen enerji ve çevre bilinci.

Dünyanın farklı ülkeleri enerji verimliliği önlemlerinin yetersizliği sorununu ele alıp enerji yönetimi alanında çeşitli araştırmalar yapmıştır (Cagno ve ark., 2013; Lozano et al. 2018). Örneğin, Çin (Zhang ve ark., 2015), Amerika Birleşik Devletleri (Worrell ve ark., 2000), Etiyopya (Tesema ve Worrell, 2015), Tayland (Hasanbeigi ve ark., 2011) ve Türkiye'den (Ates ve Durakbasa, 2012) daha önce yapılan çalışmalar çimento endüstrisindeki enerji verimliliğinin potansiyelini farklı bir bakış açısıyla araştırdı. Hasan ve arkadaşları (2018, 2019), Bangladeş endüstrisinde enerji verimliliği üzerine daha önce yapılan iki araştırmayı araştırmıştır. Andersson ve Thollander (2010) İsveç kağıt hamuru ve kağıt endüstrisinde enerji ile ilgili temel performans göstergelerinin mevcut uygulama ve operasyonel hale getirme seviyesini incelemiştir. Backlund ve ark. (2012) yönetim faaliyetlerinden kaynaklanan enerji verimliliği potansiyelinin, enerji yoğun endüstriler için daha fazla

enerji verimli teknoloji uygulama potansiyelinden daha büyük olduğunu tahmin etmiştir.

Literatürde, kuruluşlarda enerji davranışı (Andrews ve Johnson, 2016) ve çevresel davranışlar (Cheng ve ark., 2019) üzerine çalışmalar sunulmuştur. Bu çalışmalar kuruluşlardaki davranış kuramından ortaya çıkmaktadır. Bir organizasyon yapısında, şirketin operasyonlarına liderlik etmek için bir yönetim ekibi önemlidir (Tiller, 2012). Sola ve Mota (2020) endüstrilerde enerji yönetimini etkileyen faktörleri bu açılarından analiz etti. Martin ve ark. (2012) tarafından geliştirilen bir çalışma daha iyi enerji verimliliği ve üretkenliğinin yönetim uygulamalarıyla güçlü bir şekilde ilişkili olduğunu göstermektedir. Neves ve ark. (2017) tarafından geliştirilen bir araştırmaya göre pazar, çevre yönetim sisteminin (ISO 14001) benimsenmesini de etkilememektedir. Rekabet avantajı, ISO 50001'i kuruluşlarda uygulamak için harici bir nedendir (Marimon ve Casadesús, 2017). Bir sanayi şirketi içindeki enerji yönetimi faaliyetleri, biri enerji son kullanımını kontrol eden çeşitli bileşenlerden oluşmaktadır (Schulze, 2016). Enerji yönetiminin kontrol unsurları arasında veri toplama ve izleme, enerji performansını karşılaştırma ve performans değerlendirmesi yer almaktadır. Bazı üretim şirketleri için ISO 50001 standardına uygun bir enerji yönetim sistemi uygulamak doğal bir ilk adımdır.

Pompalarda uygulanan başlıca verimlilik arttırıcı proje örnekleri: değişken hız sürücü DHS (frekans invertör) veya yumuşak yol verici (soft starter) uygulaması, yüksek verimli motor uygulaması, gereğinden fazla kapasitede seçilmiş pompalarda enerji verimliliğini arttırıcı önlem olarak pompa çarklarının tornalanarak küçültülmesi çalışmaları, yüksek verimli pompa uygulamalarıdır. Fanlarda değişken hız sürücü (frekans invertör) uygulaması, yüksek verimli motor uygulaması, fan sisteminin modernizasyonu, uygun hava kontrol ve debi ayarlama sistemi çalışmaları,

fanlarda kayıp ve kaçakların önlenmesi çalışmaları ile verim artışı sağlanmaktadır.

Literatürde yer alan pompalarda verimliliği ve enerji tasarrufunu arttırmaya yönelik çalışmalar, daha çok frekans invertör uygulamalarını kapsamaktadır. Ahmed vd. (2022) çok pompalı bir sistemde iki gelişmiş değişken hız sürücüsü (frekans invertör) tekniği (çok pompalı tek sürücülü ve çok pompalı çok sürücülü) kullanarak enerji tasarrufunu incelemiştir. John vd. (2013) su pompası istasyonlarında çoklu pompa-motor sistemlerinde frekans invertör kullanarak enerji verimliliğini üst düzeye çıkartmak ve enerji tüketimini en aza indirerek enerji tasarrufu sağlamıştır. Bakmak vd. (2014) çoklu pompa istasyonlarında çalışan pompa sayısının bir model kontrol algoritmasına bağlı olarak seçimine dayalı çalışma yapmışlardır. Ayrıca Bakmak vd. (2015) diğer bir çalışmalarında enerji verimliliğe göre çalışan pompa sayısını belirlemişlerdir. Bakman ve Gevorkov (2015) paralel başlı pompa istasyonundaki verimliliği incelemiştir. Vodovozov vd. (2016), (2017) ve Vodovozov ve Raud (2017) çoklu pompa sistemlerinde değişken hız sürücüsü (frekans invertör) kullanımı üzerine çalışmalar yaptılar. Luna vd. (2019) su pompalama sisteminde verimliliğini arttırmak için bir hibrit optimizasyon yöntemi üzerine çalışmışlardır. Gün boyunca pompalama programını optimize etmek için bir genetik algoritma kullanılmışlardır.

Literatürde yer alan fanlarda elektrik tüketimini azaltma yönelik çalışmalar, daha çok tasarımsal iyileştirmeleri kapsamaktadır. Sen (1997) aksel fanların aerodinamik, mekanik, elektriksel, yapısal ve operasyonel faktörlerinin, fan verimliliği ve minimum güç tüketimi üzerine etkisini incelemiştir. Hustrulid ve Bullock'a (2001) fanlarının çok düşük verimliliğinin ana nedenlerinin, %50'nin altında statik verim sağlayan temel nedenler olan zayıf aerodinamik tasarım, yanlış fan seçimi ve fan sahasındaki zayıf aerodinamikten kaynaklandığını belirtmiştir. Belle (2008), fan

verimliliğinde %10'luk bir artış ile elektrik tüketiminde %10'luk bir azalmanın, yılda 10.81 MW elektrik tasarrufu ile sonuçlanabileceğini bildirmiştir; bunun 10 yılda 16,08 milyon ABD Doları kazanç sağlayacağını belirtmiştir. Literatürde yer alan diğer çalışmalarda Mishra (2004); Panigrahi, Mishra, Divaker ve Sibal (2009), fan verimini arttırmak ve enerji tüketimini azaltmak için fan kanat tasarımı ve frekans invertör kullanımı konularında çalışmıştır. Panigrahi ve Mishra (2014) maden havalandırmasında kullanılan fan kanat profilini enerji verimliliği artıracak, havalandırmada enerji tasarrufu sağlayacak şekilde tasarlamıştır. Souza (2015) fan sistemlerinin performansını ve verimliliğini arttırmak için mühendislik tasarım ilkelerinin nasıl uygulanabileceği ve bunun sonucunun güç tüketimine, işletme maliyetine ve sera gazı emisyonlarına etkisi üzerine çalışmıştır. Okochi ve Yao (2016)' nun çalışmalarında fan sistemlerinin enerji tüketimini en aza indirmek için besleme havası sıcaklığı ve hava akış hızı optimizasyonu ana hedef olmuştur. Besleme havası sıcaklığını kontrol ederek fanların çalışma gücünün yanı sıra ısıtma ve soğutma enerjilerini en aza indirmek mümkündür (Wei, Claridge 2000). Shim vd. (2013) fan enerjisi, statik basınç kontrol stratejileri ile %5-30 oranında azaltılabileceğini belirtmiştir. Yee vd. (2002) fan hızı kontrolü ile enerji tasarrufu ve finansal faydalar sağlanabileceğini belirtmiştir.

Bu çalışmada, T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı Enerji Verimliliği ve Çevre Dairesi Başkanlığına bağlı Enerji Verimliliği Test Laboratuvarındaki “enerji yöneticisi eğitimi” için tasarlanmış pompa ve fan deney düzeneklerinde yapılan, enerji verimliliğini artırıcı uygulamalardan, deneysel çalışmalardan faydalanılmıştır. Uygulamalardaki deney koşulları belirlenirken sanayideki gerçek çalışma ve işletme koşulları dikkate alınmıştır. Deneysel çalışma ile kastedilen, laboratuvar ortamında sanayideki gerçek çalışma ve işletme koşullarının sağlandığı gerçek boyut ve kapasitelerdeki tesisatlarda yapılan kontrollü deneylerdir. Çalışmada, enerji yöneticisi eğitimi

dersleri esnasında yapılan kontrollü deneylerde ölçülen veriler kullanılmıştır. Deneylerden elde edilen ölçüm verileri kullanarak, farklı çalışma koşullarındaki pompa ve fan sistemleri için verim ve enerji tasarrufu değerleri hesaplanmıştır.

Bu çalışmanın amacı, endüstrilerde enerji verimliliğini artırmaya yönelik enerji yönetimi uygulamalarını göstermek ve yapılan verimlilik artırıcı deneysel çalışmaların verilerini analiz ederek, pompa ve fan sistemlerinin enerji tasarruf değerlerini belirlemektir. Deneylerde, hangi koşullarda pompa ve fanların verimli kullanılabileceğinin tespiti için çeşitli varyasyonlar yapılmıştır. Çalışmada, pompalarda ve fanlarda frekans invertör kullanımı ile gerçekleştirilebilecek enerji verimliliği artırıcı uygulamaları örnekleri ele alınmıştır. Yapılan deneylerde ölçülen veriler ile yapılan hesaplamalar sonucunda, frekans invertör kullanılarak değişken debili fan sistemlerinde ve pompa sistemlerinde %60 enerji tasarrufu sağlanmıştır.

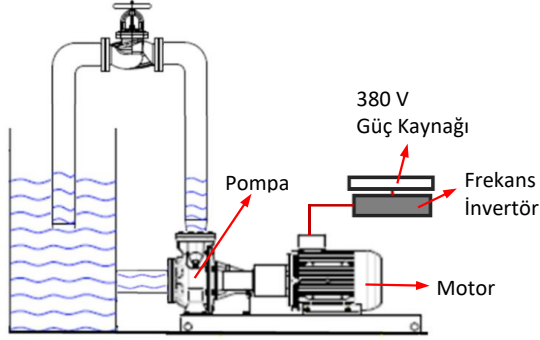
Bu çalışmanın literatüre katkısı, sanayideki gerçek çalışma ve işletme koşullarının dikkate alınıp, laboratuvardaki deney tesisatlarında bu koşulların uygulanarak, pompa ve fanların hangi koşulda enerji verimliliğini üst düzeye çıkartılabileceğinin ve enerji tüketimini en aza indirilerek enerji tasarrufu sağlanabileceğinin vurgulanmasıdır. Fabrikalarda prosesin kalitesini bozmamak için sabit basınç gerektiğinden, bir sanayi kuruluşunda gerçek uygulamada bu derece değişken koşullarda deney yapmak sakıncalı olmaktadır. Yapılan farklı koşullardaki deney sonuçlarına göre pompa ve fan sistemlerinde değişken hız sürücüsü (frekans invertör) kullanımı ile enerji atıklarının, kayıpların ve verimsizliklerin azaltılmasının sağlanmaktadır.

2. Yöntem

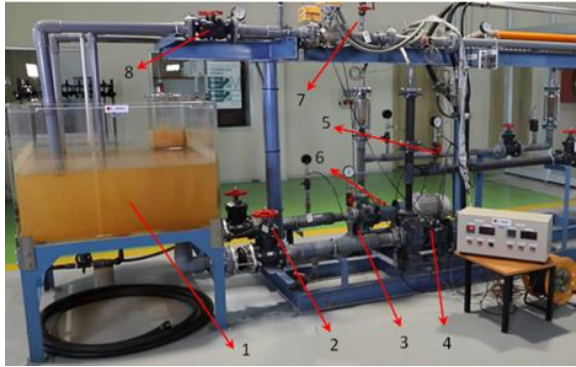
2.1. Deney Tesisatları

Pompa deney tesisatı

Şekil 2’de santrifüj pompa deney tesisatının şematik resmi ve Şekil 3’te fotoğrafı yer almaktadır. Deney tesisatı, pompa, elektrik motoru, su tankı, akış kanalları, vanalar ve ölçüm cihazlarından oluşmaktadır. Tablo 1’de pompa deney tesisatı sistem elemanları listelenmiştir. Sisteminde, pompa yardımıyla su tankından alınan su tekrar tanka pompalanmaktadır. Deneyde statik basma yüksekliği 1 m’dir.



Şekil 2. Pompa deney tesisatı şeması



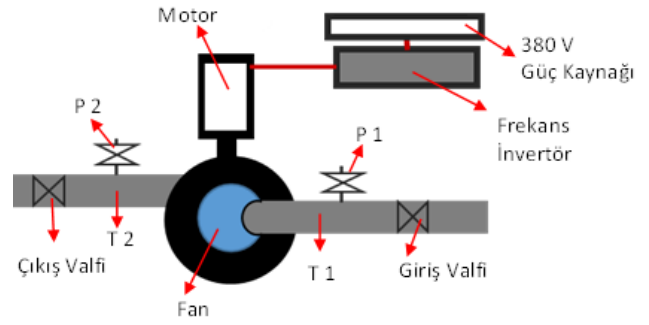
Şekil 3. Pompa deney tesisatı

Tablo 1. Pompa deney tesisatı sistem elemanları

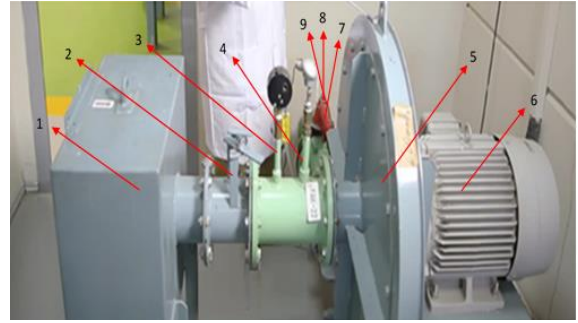
Numara	Sistem elemanı
1	Su tankı
2	Emiş vanası
3	Emiş basınç ölçümü manometre
4	Pompa – Elektrik motoru
5	Pompa çıkış basıncı ölçümü
6	Çıkış vanası
7	Hat sonu basınç ölçümü (kullanıcılar için)
8	Hat sonu vana (debi ayarı için) kullanıcı vanası

Fan deney tesisatı

Şekil 4’te şematik resmi, Şekil 5’te fotoğrafı görülen fan deney tesisatında, radyal tip santrifüj fan kullanılmıştır. Tablo 2’de fan deney tesisatının sistem elemanları yer almaktadır. Tablo 3’te fanın teknik özellikleri görülmektedir. Fan girişinde ve çıkışta damper, termokupl ve basınç ölçer vardır. K Tipi (Ni-Cr-Ni) termokupl ile sıcaklık ölçümü yapılmıştır. Damperle mekanik yöntem ile debi kontrolü yapılmaktadır.



Şekil 4. Fan deney tesisatı şeması



Şekil 5. Fan deney tesisatı

Tablo 2. Fan deney tesisatı sistem elemanları

Numara	Sistem elemanı
1	Emiş havzası
2	Giriş valfi
3	P1- Giriş Basınç ölçer
4	T1- Giriş termokupl
5	Radyant tip santrifüj fan
6	Elektrik motoru
7	Çıkış valfi
8	P2- Çıkış basınç ölçer
9	T2- Çıkış termokupl

Tablo 3. Fan teknik özellikleri

Özellikler	
Tip	Tek emişli
Kapasite	30m ³ /dk x 6.3 kPa x 2960 dk ⁻¹
Motor	11 kW, 380 V, 2P

3. Deneysel çalışmalar, sonuçlar ve tartışmalar

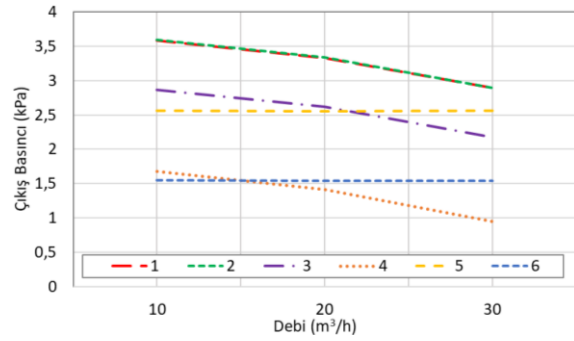
Pompa deneyi

Pompa deney tesisatında su debisi 10 m³/h -30 m³/h arası değerlerine ayarlanmıştır. Emiş basıncı, çıkış basıncı, hat sonu basıncı ve enerji analizöründen tüketilen güç ölçülmüştür. Deneylerde, pompaların hangi koşullarda verimli kullanılabildiğinin tespiti için 6 farklı varyasyonlar test edilmiştir. Tablo 4'te pompa deney koşulları listelenmiştir.

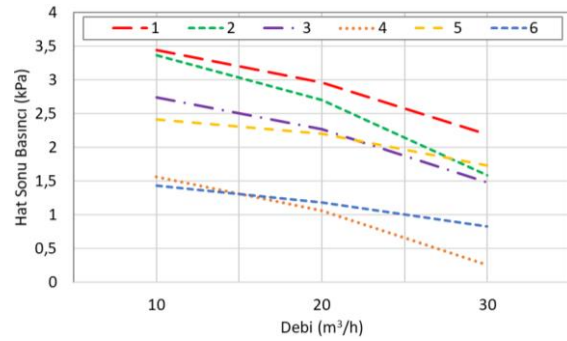
Tablo 4. Pompa deneyi koşulları

Deney no	Deney koşulları
1	Normal koşullar f=50 Hertz
2	Çıkış vanası %50 kısılırsa f=50 Hertz
3	Frekans invertör 45 Hertz
4	Frekans invertör 35 Hertz
5	Frekans invertör otomatik kumanda, P _{çıkış} =250 kPa sabitlendi set değeri
6	Frekans invertör otomatik kumanda, P _{çıkış} =150 kPa sabitlendi set değeri

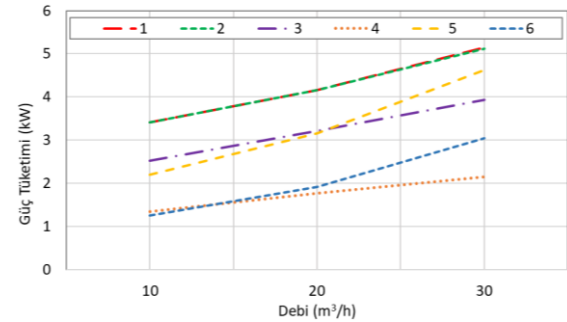
Şekil 6, Şekil 7 ve Şekil 8 (Tablo 4'te belirtilen) 6 farklı deney koşulu için 10 m³/h - 30 m³/h pompa debilerindeki pompa çıkış basıncını, hat sonu basıncını ve pompa güç tüketimini göstermektedir. Şekil 9'da 5 farklı deney koşullarında normal koşula (1 numaralı deney koşuluna) göre sağlanan enerji tasarrufu görülmektedir.



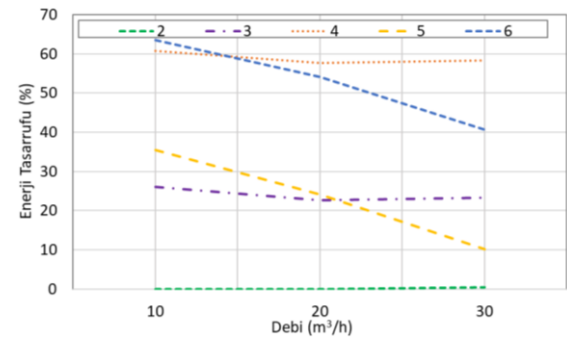
Şekil 6. 6 farklı deney koşulu için pompa çıkış basıncının farklı debilere göre değişimi



Şekil 7. 6 farklı deney koşulu için pompa hat sonu basıncının farklı debilere göre değişimi



Şekil 8. 6 farklı deney koşulu için pompa güç tüketiminin farklı debilere göre değişimi



Şekil 9. 5 farklı deney koşulu için pompa enerji tasarrufunun farklı debilere göre değişimi

1 numaralı deney, pompanın normal koşullarda, 50 Hertz frekansta çalışma durumudur. 2 numaralı deneyde, pompa 50 Hertz'te, çıkış vanası %50 kısılarak çalıştırılmıştır. Sanayide değişken debi ile çalışan sistemlerde pompa debisi azaldığı zaman Şekil 6'da görüldüğü üzere çıkış basıncı çok yüksek değerlere ulaşmakta, bu da gerek tesisata zarar vermekte veya hattın sonunda ihtiyaç duyulan basınçtan daha yüksek bir basınç oluştuğundan sanayi ürünlerinde sıkıntı oluşturabilmekte ve üretimi kesintiye uğratabilmektedir. Bundan dolayı çıkış vanası kısılarak hattın içindeki basınç kaybı artırılır, çıkış basıncı değişmez ama Şekil 7'de görüldüğü gibi hattın sonundaki basınç değişir. Şekil 6'da görüldüğü gibi, pompa debisi azaldığında çıkış basıncı artar. Yani dinamik basma yüksekliği artar. Debi arttıkça kayıplar artacağı için, çıkış basıncı ile hat sonu arasındaki basınç farkı artar. Debi arttıkça sürtünme kuvveti artar. Debi düşük olunca $P_{\text{çıkış}}$ ve $P_{\text{hat,sonu}}$ basıncı arasındaki fark daha az olur. Şekil 8'de görüldüğü gibi 1 ve 2 numaralı deneylerde çekilen güçler eşittir. Çıkış vanasını kısıldığında daha az güç harcanmamakta, sistem tasarruflu çalışmamaktadır. Ayrıca, pompa debisini büyük seçip, pompayı düşük debide çalıştırmak tasarruf sağlamamaktadır.

Tablo 4'te belirtilen 3 ve 4 numaralı deneylerde, daha düşük çıkış basıncına ihtiyaç duyulursa frekans azaltılır (Şekil 6). Böylece, Şekil 6, Şekil 8 ve Şekil 9'da görüldüğü gibi çıkış basıncı azalır ve buna bağlı olarak güç azalır ve tasarruf yapılır. Diyagramdan görüldüğü gibi, frekans azaltılınca pompa çalışma eğrisi aşağıya doğru kayar. İntertörlü veya değişken frekanslı sürücü sistemleri, alternatif akımın frekansını ve dolayısı ile motorun dönüş hızını değiştirerek motorun gereğinden fazla yük çekmesini önler. İhtiyaç duyulan çıkış basıncı değeri yakalanıncaya kadar frekans azaltılır. Bu da aynı işin çok daha az enerji kullanarak yapılmasını sağlar. Değişken debili sistemlerde frekans invertör kullanılması tasarruf sağlar (Şekil 9). Debi sabit olan

yerlerde frekans invertör kullanımı fayda sağlamaz. Değişken debilerde en yüksek debide minimum basma yüksekliği ihtiyacı ve minimum çıkış basıncı ihtiyacını sağlayacak bir pompa satın alınır.

Tablo 4'te belirtilen 5 ve 6 numaralı deneylerde, frekans invertör, otomatik kumandada çıkış basıncı için sabitlendi. Frekans invertör sadece çıkış basıncına göre değil, farklı parametrelere göre de sabitlenerek ayarlanabilir. Böylece hedef parametreyi sağlayacak şekilde frekans değişimi sağlanır. Örneğin kalorifer tesisatında debi değişimine, ısınma ihtiyacına ve dış ortam sıcaklığına bağlı olarak, suyun giriş ve dönüş sıcaklığı arasındaki farka bağlı olarak frekans değiştirilebilir. Diyagramda sadece çıkış basıncına göre ayarlanmıştır.

Fan deneyi

Yapılan deneylerde fanın enerji tüketimini azaltma yöntemleri incelendi. Fan sistemlerinde önemli olan debi kontrolüdür. Ama günümüzde enerji fiyatlarının artmasıyla, maliyeti düşürmek amaç olmuştur. Fan ve pompalarda elektrik tüketimini azaltma yöntemleri üzerine çalışmalar yapılmaya başlanmıştır.

Fan sisteminde kullanılan elektrik motorlarının devri, kullanılan frekansa bağlıdır. Değişken hız sürücü tek başına işe yaramaz, mutlaka geri besleme sinyali almak zorundadır. Yapılan deneylerde, fanın çıkışından değişken hız sürücüsüne sinyal gönderilmektedir. Değişken hız sürücüsü basınç sensörünün 3 kPa ve 4 kPa değerlerine göre ayarlanmıştır. Çünkü fabrikalarda prosesin kalitesini bozmamak için sabit basınç gereklidir.

Fan deney tesisatında hava debisi 500 m³/h - 1500 m³/h arası değerlerine ayarlanmıştır. Deneylerde, çıkış basıncı, statik basıncı farkı ve enerji analizöründen tüketilen güç ölçüldü ve enerji tasarrufu hesaplanmıştır. Deneylerde, fanın hangi koşullarda verimli kullanılabildiğinin tespiti için fan 7 farklı koşulda test edilmiştir. Tablo 5'te fan deneyi koşulları

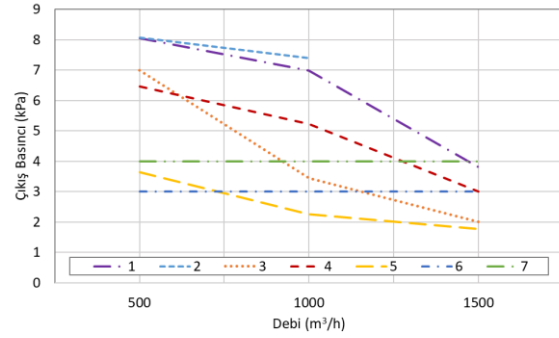
listelenmiştir. Deney koşulları belirlenirken sanayideki gerçek çalışma ve işletme koşulları dikkate alınmıştır. Sanayide vana kısılınca enerji tasarrufun artacağı düşüncesi yaygındır. Fakat deneysel veriler sonucu yapılan analiz bu düşüncüyü çürütmektedir.

Tablo 5. Fan deneyi koşulları

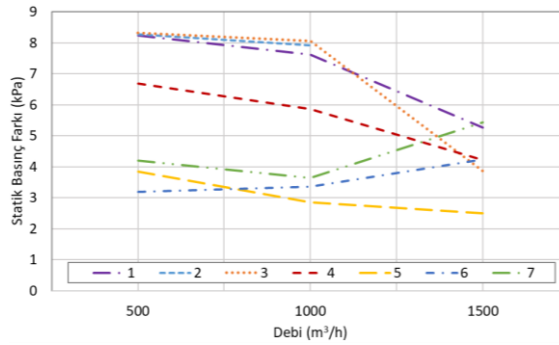
Deney No	Emiş Damperi	Çıkış Damperi	Frekans
1	%100	%100	50 Hertz
2	%100	%50	50 Hertz
3	%50	%100	50 Hertz
4	%100	%100	Frekans invertör 45 Hertz
5	%100	%100	Frekans invertör 35 Hertz
6	%100	%100	Frekans invertör otomatik kumanda, $P_{\text{çıkış}}=3$ kPa sabitlendi set değeri
7	%100	%100	Frekans invertör otomatik kumanda, $P_{\text{çıkış}}=4$ kPa sabitlendi set değeri

1 numaralı deney, fanın normal koşullarda, 50 Hertz frekansta çalışma durumudur. 2 numaralı deneyde, fan 50 Hertz 'te, çıkış vanası %50 kısılarak çalıştırılmıştır. 3 numaralı deneylerde, fan 50 Hertz 'te, giriş vanası %50 kısılarak çalıştırılmıştır. 4 ve 5 numaralı deneylerde frekans invertör manuel olarak sırasıyla 45 Hz ve 35 Hz 'e ayarlandı. 6 ve 7 numaralı deneylerde, frekans invertör, otomatik kumanda çıkış basıncı için sırasıyla 3 kPa ve 4 kPa'a sabitlendi.

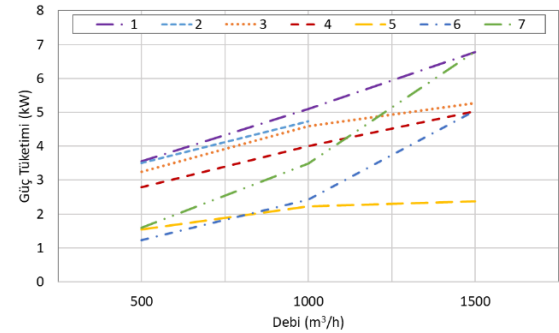
Şekil 10, Şekil 11 ve Şekil 12, Tablo 5'te belirtilen 7 farklı deney koşulu için 500 m³/h - 1500 m³/h fan debilerindeki fan çıkış basıncını, statik basınç farkını ve fan güç tüketimini göstermektedir. Şekil 13'te 6 farklı deney koşullarında normal koşula (1 numaralı deney koşuluna) göre sağlanan enerji tasarrufu görülmektedir.



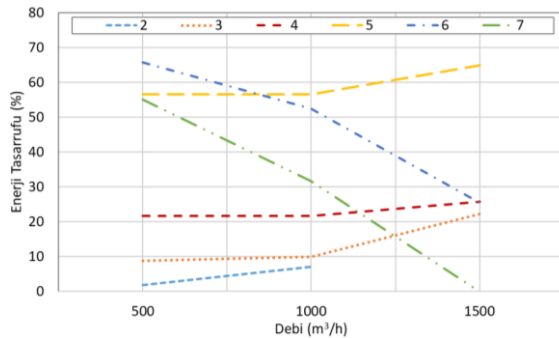
Şekil 10. 7 farklı deney koşulu için farklı debilerdeki fan çıkış basıncı



Şekil 11. 7 farklı deney koşulu için farklı debilerdeki statik basınç farkı



Şekil 12. 7 farklı deney koşulu için farklı debilerdeki fan güç tüketimi



Şekil 13. 7 farklı deney koşulu için farklı debilerdeki fan enerji tasarrufu

Tablo 5’te belirtilen 4 ve 5 numaralı deneylerde, daha düşük çıkış basıncına ihtiyaç duyulursa frekans azaltılır (Şekil 10). Böylece, Şekil 10, Şekil 11, Şekil 12 ve Şekil 13’te görüldüğü gibi çıkış basıncı, statik basınç farkı azalır ve buna bağlı olarak güç azalır ve tasarruf yapılır.

Fanlarda damper kullanılarak debi azaltıldığında, basma yüksekliği artmakta, Şekil 13’te görüldüğü gibi güç tüketiminde düşük oranda bir azalma gözlenmektedir. Aynı debi için değişken hız sürücüsü kullandığımızda, frekans azaldığı için devir azalacak, basma yüksekliği azalacak ve dolayısıyla güç tüketimi azalacaktır. Şekil 12’de görüldüğü gibi fan sistemlerinde debi ayarı giriş ve çıkış damperlerinin kısılmasıyla yapılırsa, güçteki azalma maksimum %10 mertebesinde olmaktadır. Şekil 13’te görüldüğü gibi fan sistemlerinde debi ayarı fan devri değiştirilerek yapılırsa %60’lara varan bir güç tasarrufu yapılmaktadır. İşletmede fan sistemlerinde çıkış basıncının sabit değerinde olması istenmesi durumunda frekans invertörün otomatik basınç kontrolü sistemle çalıştırılması uygun olmaktadır.

4. Sonuç

Endüstriyel tesislerde uygulanabilecek enerji tasarrufu yöntemleri, bilimsel olarak gerçekliği tamamen ortaya konmuş uygulamalardır. Enerji yönetimi sayesinde daha az fosil yakıt yakılması sonucu istenmeyen emisyonlar azalacak ve karbon emisyonunun neden olduğu küresel ısınma etkileri azalacaktır. Ayrıca, enerji tasarrufu ve verimliliği ülkelerin yapması gereken ve çok yüksek yatırım gerektiren yeni enerji yatırımlarının getireceği yükü azaltacaktır. Bu noktada sanayide enerji yönetimi ile verimliliğin artışı ve enerji tasarrufu gün geçtikçe daha fazla önem kazanmaktadır.

Çalışmada ele alınan sanayideki enerji verimliliği uygulamaları, kalite ve performansı düşürmeden tüketilen enerji miktarının en aza indirilmesi için

pompalarda ve fanlarda frekans invertör kullanımınıdır. Çalışmada, frekans invertör kullanımı ile enerji atıklarının, kayıpların ve verimsizliklerin azaltıldığı vurgulanmıştır. Deney koşulları belirlenirken gerçek sanayideki çalışma ve işletme koşulları dikkate alınmıştır. Sanayide vana kılınca enerji tasarrufun artacağı düşüncesi yaygındır. Fakat deneysel veriler sonucu yapılan analiz bu düşüncüyü çürütmektedir. Pompalarda çıkış vanasını kısıldığında daha az güç harcanmamakta, sistem tasarruflu çalışmamaktadır. Fan sistemlerinde debi ayarı giriş ve çıkış damperlerinin kısılmasıyla yapılırsa, güçteki azalma maksimum %10 mertebesinde olmaktadır. Frekans invertör sistemleri, alternatif akımın frekansını ve dolayısı ile motorun dönüş hızını değiştirerek pompa ve fan motorunun gereğinden fazla yük çekmesini önlemektedir. Değişken debili pompa ve fan sistemlerinde debi ayarı devri değiştirilerek yapılırsa %60’lara varan bir güç tasarrufu yapılmıştır. Sanayide enerji yönetimi konusunda yapılması planlanan çalışmalar, faaliyet gösteren bir fabrikada enerji etüt çalışması yapıp, mevcut durumu belirledikten sonra, verimlilik artırıcı proje uygulamaları ile fabrikadaki enerji tasarrufunu artırıp, iyileştirmeler yapmaktır.

Teşekkür

Bu çalışmada, T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı Enerji Verimliliği ve Çevre Dairesi Başkanlığına bağlı Enerji Verimliliği Test Laboratuvarında yapılmış olan deney verileri kullanılmıştır.

Çıkar Çatışması Beyanı

Çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Kaynaklar

AEO. Annual Energy Outlook 2018 with projections to 2050. <https://www.eia.gov/outlooks/aeo/pdf/AEO2018.pdf> [accessed July 29, 2018].

- Ahmed, B. A. Moharam, E. E. Rashad , (2022), Improving energy efficiency and economics of motor-pump-system using electric variable-speed drives for automatic transition of working points, *Computers and Electrical Engineering*, 97, 107607
- Andrews, R., Johnson, E., Energy use, behavioural change, and business organizations: reviewing recent findings and proposing a future research agenda. *Energy Res. Social Sci.*, 2016;11:195-208. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2015.09.001>
- Ates SA, Durakbasa NM. Evaluation of corporate energy management practices of energy intensive industries in Turkey. *Energy*, 2012;45:81-
- Backlund S., S. Broberg, M. Ottosson, P. Thollander, Energy efficiency potentials and energy management practices in Swedish firms (5-055-12), *ECEEE Ind. Summer Study*, 2012; 669–677
- Bakman I, Gevorkov L, Vodovozov V., 2014, Predictive control of a variable-speed multi-pump motor drive. *IEEE 23rd Int. Symp. on Ind. Electronics*, Istanbul, Turkey,.
- Bakman I, Gevorkov L, Vodovozov V., 2015, Efficiency control for adjustment of number of working pumps in multi-pump system'. 9th Int. Conf. on Compatibility and Power Electronics. Portugal
- Bakman I, Gevorkov L., 2015, Speed control strategy selection for multi pump systems. 56th Int. Scientific Conf. on Power. Riga, Latvia: Electrical Engineering of Riga Technical University;
- Belle, B.K., 2008, Energy savings on mine ventilation fans using “Quick-Win” Hermit Crab Technology- A perspective. In Jr. K.G. Wallace (Ed.), 12th U.S./North American Mine Ventilation Symposium (pp. 427–433). Reno: The University of Nevada.
- Bunse, K., Vodicka, M., Schonsleben, P., Brühlhart, M., Ernst, F.O., Integrating energy efficiency performance in production management e gap analysis between industrial needs and scientific literature. *J. Clean. Prod.*, 2011;19:667-679. <http://doi:10.1016/j.jclepro.2010.11.011>
- Cagno E, Worrell E, Trianni A, Pugliese G. A novel approach for barriers to industrial energy efficiency. *Renew Sustain Energy Rev.*, 2013;19:290-308.
- Cheng, H., Hu, X., Zhou, R., How firms select environmental behaviours in China: the framework of environmental motivations and performance. *J. Clean. Off. Prod.*, 2019;208(20):132-141. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.096>
- Elias Andersson, Patrik Thollander, Key performance indicators for energy management in the Swedish pulp and paper industry, *Energy Strategy Reviews*, 2019;24:229-235.
- Enerji Yöneticisi Ders Notları, T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı Enerji Verimliliği ve Çevre Dairesi Başkanlığına, 2021.
- Hasanbeigi A, Menke C, Therdyothin A. Technical and cost assessment of energy efficiency improvement and greenhouse gas emission reduction potentials in Thai cement industry. *Energy Efficiency*, 2011;4:93-113
- Hasan AM, Hoq MT, Thollander P. Energy management practices in Bangladesh's iron and steel industries. *Energy strategy reviews*, 2018;22:230-236
- Hasan A, Rokonuzzaman M, Tuhin RA, Salimullah SM, Ullah M, Sakib TH, et al. Drivers and barriers to industrial energy efficiency in textile industries of Bangladesh. *Energies*, 2019; 12:1775

- Hossain S. R., Istiak Ahmed, Ferdous S. Azad, A S M Monjurul Hasan, Empirical investigation of energy management practices in cement industries of Bangladesh, *Energy*, 2020;212:118741
- Hustrulid, W.A., & Bullock, R.L., 2001, *Underground mining methods: engineering fundamentals and international case studies*. Englewood, CO: Society for Mining, Metallurgy and Exploration.
- IEA- International Energy Agency, 2012. *Energy Management Programmes for Industry*. OECD/IEA, Paris, France and The Institute for Industrial Productivity, Washington, USA.
- IEA - International Energy Agency, 2018. *Energy Efficiency 2018: Analysis and Outlook to 2040*. in: Market Report Series. IEA/OECD
- John N, Rajappan SC. Energy saving mechanism using variable frequency drives. *Int. Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering* March 2013.
- Lozano FJ, Lozano R, Freire P, Jimenez-Gonzalez C, Sakao T, Ortiz MG, et al. New perspectives for green and sustainable chemistry and engineering: approaches from sustainable resource and energy use, management, and transformation. *J Clean Prod.*, 2018;172:227-232
- Luna T., Ribau J., Figueiredo D., Alves R., 2019, Improving energy efficiency in water supply systems with pump scheduling optimization, *Journal of Cleaner Production*, 213, 342-356
- Marimon, F., Casadesús, M., 2017. Reasons to adopt ISO 50001 energy management system. *Sustain. Times* 9 (1740). <https://doi.org/10.3390/su9101740>
- Martin, R., Muûls, M., de Preux, L.B., Wagner, U.J., Anatomy of a paradox: management practices, organizational structure and energy efficiency. *Environ. Econ. Manag.* <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2011.08.003>, 2012;63:208-223
- Mishra, D.P., 2004, *A Study of Energy Consumption Profile of Main Mine Ventilation Fans and Development of a Technique to Reduce the Energy Requirement in Such Systems*. Dissertation. Dhanbad: Indian School of Mines.
- Neves, F.O., Salgado, E.G., Beijo, L.A., 2017, Analysis of the environmental management system based on ISO 14001 on the American continent. *J. Environ. Manag.*, 199, 251-262 <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.05.049>
- Okochi G.S., Yao Y., 2016, A review of recent developments and technological advancements of variable-air-volume (VAV) air-conditioning systems, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 59, 784–817.
- Panigrahi, D.C., Mishra, D.P., Divaker, C., & Sibal, S.J., 2009, Application of fibreglass reinforced plastic blades in main mine ventilation fans: an innovative concept of energy saving. In D.C. Panigrahi (Ed.), *Mine Ventilation* (pp. 709–715). New Delhi: Oxford & IBH Publishing Co. Pvt. Ltd.
- Panigrahi D. C., Mishra D. P., 2014, CFD Simulations For The Selection Of An Appropriate Blade Profile For Improving Energy Efficiency In Axial Flow Mine Ventilation Fans, *Journal of Sustainable Mining* e-ISSN 2300-3960 | p-ISSN 2300-1364
- Sen, P.K., 1997, Reducing power consumption for axial flow mine ventilation fans. *Journal of Mines, Metals and Fuels*, 45(9–10), 301–303.
- Schulze, M., Nehler, H., Ottosson, M., Thollander, P., Energy management in industry e a systematic review of previous findings and an integrative conceptual framework. *J. Clean. Prod.*,

- 2016;112:3692-3708. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.06.060>
- Shim G., Song L., Wang G., 2013, Comparison of different fan control strategies on a variable air volume systems through simulations and experiments, *Build. Environ.* 72, 212–222.
- Sola A.V.H., Mota C.M.M., Influencing factors on energy management in industries, *Journal of Cleaner Production*, 2020;248:119-263
- Souza E. D., 2015, Improving the energy efficiency of mine fan assemblages, *Applied Thermal Engineering*, 90, 1092-1097
- Tesema G, Worrell E. Energy efficiency improvement potentials for the cement industry in Ethiopia. *Energy* 2015; 93:2042-2052
- Thollander, P., Palm, J., Industrial energy management decision making for improved energy efficiency e strategic system perspectives and situated action in combination. *Energies*, 2015;8:5694-5703. <https://doi.org/10.3390/en8065694>
- Tiller, S.R., Organizational structure and management systems. *Leadersh. Manag. Eng.*, 2012;2 (1):20-23.
- Wei G., Liu M., Claridge D.E., 2020, Optimize the supply air temperature reset schedule for a single-duct VAV system, in: *Proceedings of the 12th Symposium on Improving Building Systems in Hot and Humid Climates*, 2000, San Antonio, TX, 15–17 May, 2154–2157.
- Vodovozov V, Lehtla T, Bakman I, Raud Z, Gevorkov L. 'Energy-efficient predictive control of centrifugal multi-pump stations'. 15th Biennial Baltic Elect. Conf. Oct. 3-5, 2016 Tallinn, Estonia.
- Vodovozov V, Raud Z. , 2017, Predictive control of multi-pump stations with variable-speed drives. *IET Electr. Power Appl.*;11(5):911–7. Iss.
- Vodovozov V, Lehtla T, Bakman I, Raud Z, Gevorkov L., 2016, Energy-efficient predictive control of centrifugal multi-pump stations. *Int. Conf. on Electric Power Quality and Supply Reliability (PQ)* 29-31 Aug. Tallinn, Estonia.
- Yee K.F., Yik F.W.H., Chan C.W.H., Chan H.Y.T., 2002, A study on the energy saving of converting a VAV system from inlet guide vane to variable fan speed control, *Trans. Hong Kong Inst. Eng.* 9 (2), 18–24.
- Zhang S, Worrell E, Crijns-Graus W. Evaluating co-benefits of energy efficiency and air pollution abatement in China's cement industry. *Appl Energy*, 2015;147:192-213

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE EFFECT OF DESIGN CRITERIA ON POROSITY IN HPDC OF AISi9Cu3(Fe) ALLOY

M. Tahir ALTINBALIK¹, F. Atahan YÜKSEL²

¹Trakya University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, EDİRNE

²DHL Supply Chain Company, İSTANBUL

Cite this article as:

Altınbalık, M.T., Yüksel F.A. (2022). Theoretical and Experimental Investigation of the Effect of Design Criteria on Porosity in HPDC of AISi9Cu3(Fe) Alloy, *Trakya University Journal of Engineering Sciences*, 23(1), 25-36.

Highlights

- Number of runner and airflow, switch point location and second phase speed value was determined by a commercial programme in HPDC.
- Experimental studies were carried out with a die set manufactured in accordance with the simulation results.
- The porosity level was found to be very low and acceptable according to the standards.

Article Info

Abstract

Article History:

Received:
March 30, 2022

Accepted:
May 15, 2022

Keywords:

HPDC;
Switch length;
Porosity;
Airflow

The aim of present study is to prevent the rejection of parts because of the porosity during the high pressure die casting (HPDC) process. Die design was carried out for the production of the engine connection part for automotive industry with HPDC. Process parameters taken into consideration for study are number of runner and airflow, switch point location and second phase speed value. Number of airflows and runner was determined according to simulations. In order to determine the number of runners, simulations were made by considering 5 basic parameters and care was taken not to turbulent material flow in the mold. Then, the location of the switch point and the second phase speed were determined by simulation studies. After the simulation studies were completed, the molds were manufactured. Then, HPDC process was carried out using AISi9Cu3(Fe) alloy. The casted parts were analyzed by means of porosity using computed tomography (CT) and optical microscope (OM). The porosity level was found to be very low and acceptable according to the standards.

ALSi9Cu3(Fe) ALAŞIMININ YÜKSEK BASINÇLI DÖKÜMÜNDE TASARIM KRİTERLERİNİN POROZİTEYE ETKİSİNİN TEORİK VE DENEYSEL OLARAK ARAŞTIRILMASI

Makale Bilgileri

Öz

Makale Tarihiçesi:

Geliş:
30 Mart 2022

Kabul:
15 Mayıs 2022

Anahtar Kelimeler:

HPDC;
Sviç uzunluğu;
Porozite;
Hava cebi

Bu çalışmanın amacı, yüksek basınçlı döküm (HPDC) prosesiyle elde edilen parçaların porozite nedeniyle reddedilmesini önlemektir. Kalıp tasarımı otomotiv endüstrisinde kullanılan bir motor bağlantı parçasının HPDC ile üretimi için yapılmıştır. Çalışma için dikkate alınan proses parametreleri, yolluk ve hava cebi sayısı, sviç noktası konumu ve ikinci faz hızıdır. Hava cebi ve yolluk sayısı simülasyonlara göre belirlenmiştir. Yolluk sayısını belirlemek için 5 temel parametre dikkate alınarak simülasyonlar yapılmış ve kalıpta türbülanslı malzeme akışı olmamasına özen gösterilmiştir. Daha sonra simülasyon çalışmaları ile sviç noktasının konumu ve ikinci faz hızı belirlenmiştir. Simülasyon çalışmaları tamamlandıktan sonra kalıplar işlenmiştir. Daha sonra AISi9Cu3(Fe) alaşımı kullanılarak basınçlı döküm işlemi gerçekleştirilmiştir. Üretilen parçalarda, bilgisayarlı tomografi (CT) ve optik mikroskop (OM) kullanılarak gözeneklilik kontrolü yapılmıştır. Porozite seviyesi standartlara göre çok düşük ve kabul edilebilir mertebede bulunmuştur.

1. Introduction

Doehler produced parts by applying the high-pressure casting method to aluminum alloys in 1915, and the use of HPDC has become a widespread industry. In the high pressure die casting method for the alloys such as aluminium, the most important component of the design is the injection die. The injection die is designed and produced according to different capacity injection machines depending on the part to be produced. The production life of the dies may vary and can be up to 100,000-150,000 parts.

The high pressure casting (HPDC) process is a very useful and preferred manufacturing method for mass production of casting alloys with high dimensional accuracy, good surface quality and great productivity. Aluminium, magnesium, copper and zinc parts can easily be produced by this method. The design and layout of casting systems (gate and runner, overflows, vents) are vital factors influencing melt flow properties during HPDC die filling. Correct configuration of gate and runner systems and optimum casting parameters can lead to casting components with improved mechanical properties and casting consistency. In order to inject molten metal into the die, mainly two different systems may be used as; hot chamber system and cold chamber system. Karthik et al. (2020) experimentally showed the optimization of high pressure die casting process parameters such as melt temperature, die preheat temperature and compression pressure load. The researchers also determined the most important process parameter affecting hardness and density. Zhou et al. (2019) designed a new runner and showed that the mechanical properties of the cast alloys produced with the optimized runner system increased obviously. Ultimate tensile strength and elongation for HPDC aluminum alloys has been improved by Gunasegeram et al. (2013) by optimization of runner design and increasing the piston velocity. Kwon and Kwon (2019) studied the design of HPDC gating systems using CAE method and predicted the cast defects accordingly. Cho

and Kim (2014) investigated the effects of cooling rate on the solidification behaviour of two aluminium alloys during high pressure die casting (HPDC). They also used MAGMA simulation in order to compare experimental results with the software. Gökçil (2019) performed a doctoral study on optimum die design and determination of casting process parameters with the help of Magmasoft software during the production of a commercial product by high pressure casting method. Thoma et al performed an experimental study. In the mentioned study, the tensile specimens obtained from the parts produced by the HPDC method were modelled in numerical casting simulation according to their geometry and position in the casting part. It has been shown that the mechanical properties of the specimens are compatible with the simulation results of a commercial casting simulation software called Flow-3D. Patel et al. (2014) studied the effect of process parameters such as die temperature, pouring temperature and compression pressure on the surface roughness and density of the LM20 alloy. Balikai et al. (2018) carried out studied the optimization of the process parameters of the HPDC process for the ADC 12 aluminum alloy. Nagasankar et al. (2018) investigated the reduction of vents in the HPDC machine by changing the levels in the process factor high-speed change position. In their study, the authors also changed the design of the die by changing the inlet direction to improve the model of the molten metal flow. They revealed that with the improved die design, the rejection rate decreased from 20% to 8.9%.

On the other hand, depending on the process parameters during injection, turbulent melt flow causes entrapped air and gas porosity, which degrades the mechanical properties. There are two types of porosity formation in the HPDC process. The first of these occurs as a result of gas entrapment in the die filling at high speed. In the second, they are pores caused by shrinkage during solidification (Li et al., 2016). Some investigators have shown that the application of vacuum in HPDC

processes significantly reduces the amount of entrapped gas during the filling (Niu et al., 2000; Li et al., 2016; Hu et al., 2017). Tsoukalas (2003) investigated the effect of die casting machine parameters (piston speed, condensation pressure, die cavity filling time) on porosity formation in casting components. In the mentioned study, it has been revealed that the optimum selection of casting parameters leads to the optimum porosity value in the finished part. Dumanic et al. (2021) simulated high-pressure die casting of A356 semi-solid aluminium alloy by using three input parameters such as liquid fraction of slurry, plunger velocity at 2nd phase and die geometry. Optimal process parameters have been obtained the Taguchi-based 'grey relational analysis' approach in order to prevent microporosity. Lu et al. (2009) found that the initiation and expansion of the fatigue crack were highly sensitive to geometry, size and distribution of the porosity. Teng et al. (2009) investigated the relationship between ductility and the largest pore size on the fracture surface in the casting of Al-9Si-0.3 Mg alloy with HPDC. In his thesis, Kenar (2019) studied the valve (gas discharge) die designs of two different automotive components produced from AlSi12Cu1Fe and AlSi10MgFe alloys by high pressure casting process and examined the results. Studies have focused on cold bonding, blister and porosity casting defects. In his thesis, Doğan (2019) investigated the comparative performance of three different degassing systems with different designs on two different aluminum alloy parts (AlSi9Cu3-Fe, AlSi10Mg-Fe) in a high pressure die casting system. For the quality analysis of the cast parts produced, porosity regions, porosity ratios and distributions were determined by X-Ray radioscopy, computed tomography (CT).

In this study, a die design for the production of the engine connection part of an automotive with HPDC was made for the company headquartered in Europe. This connection part is expected to have high strength.

There should be no breakage in this part, which has a critical task. For this reason, the porosity level of the part should be very low and there should never be a shrinkage gap. 5 main parameters were considered for design of runner and then switch point location and plunger speed were determined by a commercial CAD programme called NOVAFLOW&SOLID. AlSi9Cu3(Fe) alloy was chosen as cast material. Porosity analyzes were carried out by computed tomography optical microscope.

2. Determination of the Design Parameters According to Simulation

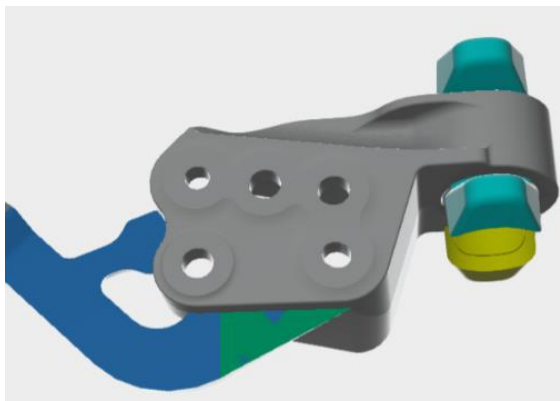
2.1. Airflow Design

The primary task of the airflow is to expel the air and the gases inside the die during the injection of the product. At the design stage of the die, the airflow should be placed in the thickest region of the product and the furthest away from the runner. An important point to be followed in the simulation is that the airflow should not be filled before the product. Otherwise, porosity will be occurred in the part. In the presented study, a total of four-airflows were designed for the part to be produced and placed in the appropriate place of the die.

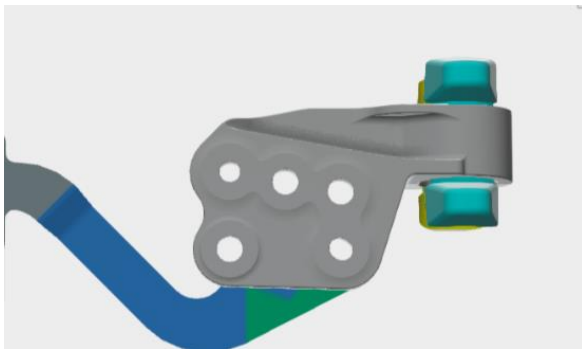
2.2. Runner Design and Detection of Number of Runners

There are certain parameters for the runner design. The most important of these parameters is the calculation of the cross-sectional area. While calculating the cross-sectional area, it starts from the area of the entry region and continues until the biscuit area. After the calculating of the cross-sectional area, the runner design is performed. Too many indentations, curves, sharp corners are not preferred in the runner design. The flow should always be laminar, and there should be no loss of energy. In this study, the runner design of the part was designed considering these criteria.

Generally, it is not preferred to use more than single runner when designing runners in injection dies. However, since the part to be produced in the presented study is relatively large and thick, two-runners can also be preferred. In this regard, two different designs including one runner and two-runners were considered for the injection of the part to be manufactured and shown in Figure 1. The simulation results for both runner types are analyzed by considering different parameters given below and the most suitable design in terms of surface quality and porosity was determined.



a)



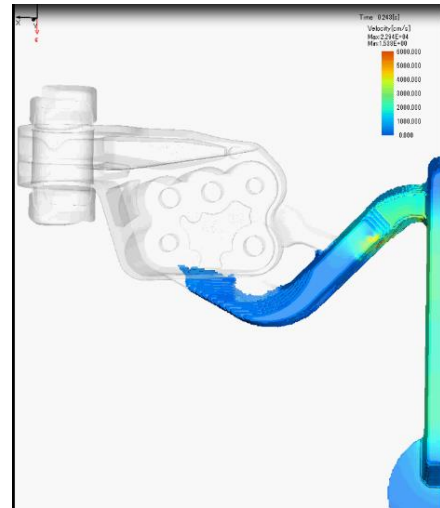
b)

Figure 1. a) Design of two-runner for the part b)
Design of single runner for the part

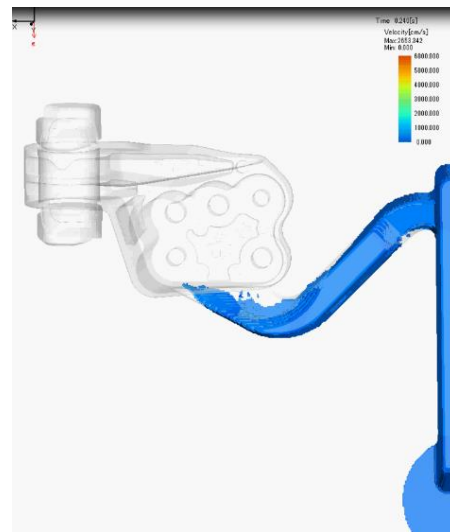
2.2.1. Metal Flow into the Die

Metal flow simulation was performed under nominal conditions and the results are shown in Figure 2. Figure 2.a shows the simulation results of the design with two-runners. As it can be seen, while aluminum alloy will be filled into the part from the large runner, aluminum

alloy has not yet come to the other runner inlet. This will disrupt the laminar flow conditions in the die and increase the possibility of porosity. Because after the material flow from the first runner, the entry of material from another runner creates turbulence. As can be seen in Figure 2.b, there is no such danger in a single runner.



a)



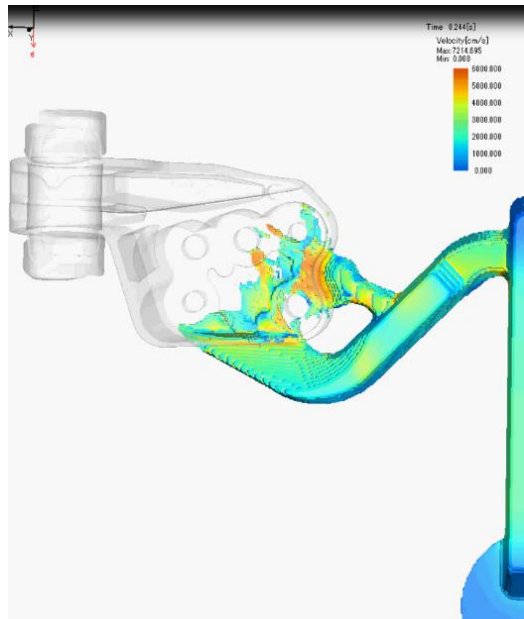
b)

Figure 2. Metal flow condition results a) Metal flow simulation of two-runner design b) Metal flow simulation of single runner design

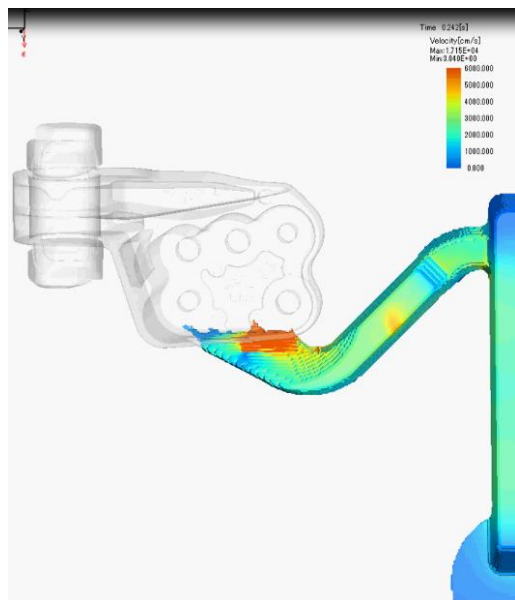
2.2.2. Sticking over the Pin

Due to the original geometry of the part, there is a pin on the part. This pin is very close to the smaller runner in the two-runner system, depending on the design, as

shown in Figure 3.a. When the simulation is examined in detail, the molten aluminum hits the pin at high speed. Therefore, the surface quality of the part will be deteriorated and the part will be discarded during the quality control stage. In the single runner design shown in Figure 3.b, the injected aluminum alloy fills the die without hitting the pin and laminar flow takes place in the die.



a)

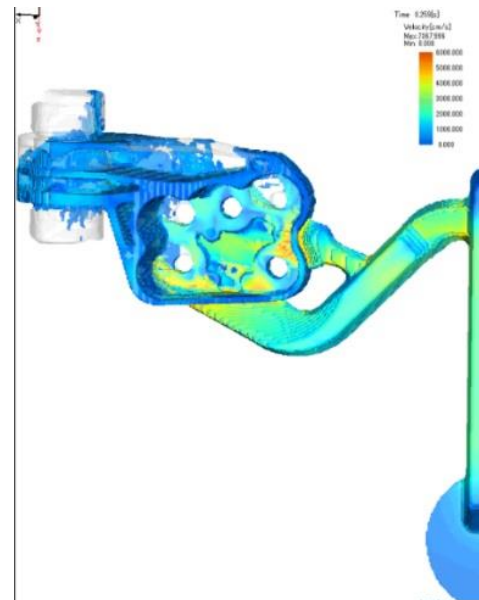


b)

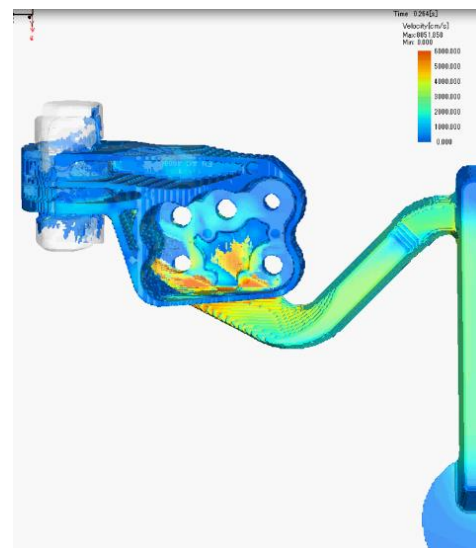
Figure 3. Sticking situation results a) Molten material hitting the pin b) No risk for the pin

2.2.3. Filling of Airflow before the Part

The filling of the molten alloy into the airflow is an important problem that must be examined during the simulation. If the airflow is fulfilled with alloy before the part, there is a high probability that a turbulence will form in the die after injection and this leads to porosity.



a)



b)

Figure 4. Filling of airflows a) Turbulence in the die b) Smooth flow in the die

When figure 4.a is examined, because turbulence occurs in the two-runner design, the airflows are filled with metal. Meanwhile, the inside of the die is not completely filled. The material entering the airflow will

fulfill the airflow and move towards the inside of the die. This will cause the formation of porosity in the part. The material flow simulation for the single runner design is shown in figure 4.b. As can be seen from the figure, in such this design, the airflow is filled with material after the whole piece is fulfilled.

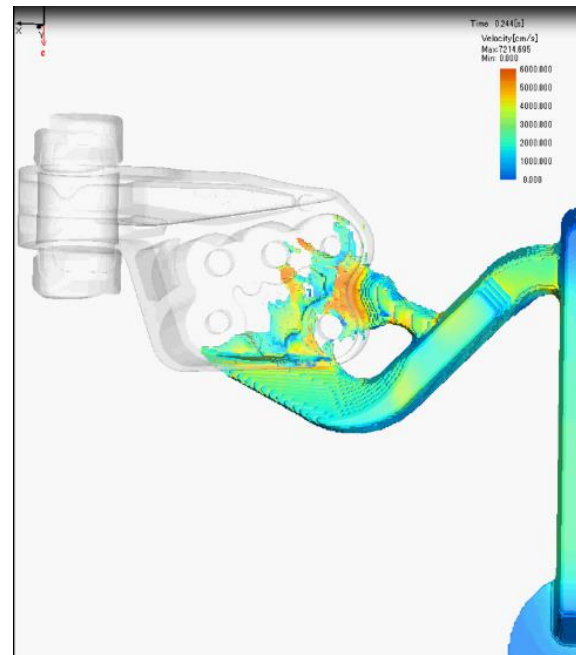
2.2.4. Metal Flow

As seen in the simulation in figure 5.a, there is a fast and hot flow direction from the large runner to the thick wall of the part for the two-runner design. The metal entering through the smaller runner follows a different flow direction. While the molten aluminum entering from the large runner moves upwards, the molten aluminum entering the die from the small runner on the right flows directly across. Thus, molten metal coming from two different directions collides with each other inside the die. This situation creates turbulence at the entrance of the die and traps the air inside, causing porosity. For the single runner design in 5.b, the metal flow is in one direction, as it can be seen. In this case, there is a laminar flow and the possibility of porosity is reduced.

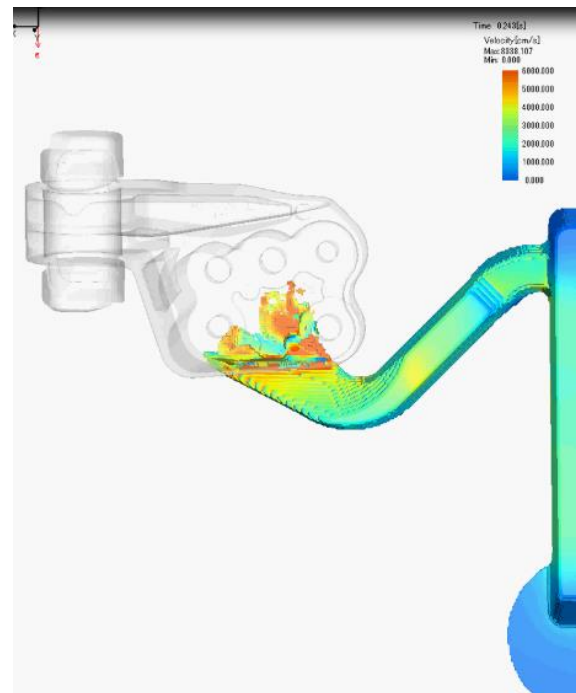
2.2.5. Inspection of Porosity

The last step before the dies are processed, the possible porosity sizes and ratios are examined by using the simulation program. According to the porosity standards, depending on the wall thickness of the piece being examined, the porosity images are divided into 2 sections and 4 levels depending on the ASTM criteria. The wall thickness of the part to be injection molded is less than 9.5 mm in some places and larger in some places. Accordingly, it is possible to make a comparison by using the tables and images in the “Standard Reference Radiographs for Inspection of Aluminum and Magnesium Die Castings” ASTM E505 (2011). When figure 6.a and figure 6.b are examined together, the porosity number and density are much less for the single runner design. The dots in the image

represent the porosity. The change in the color of the dots from blue to orange gives an idea about the size of the porosity that will occur in that region.



a)



b)

Figure 5. Metal flow simulations a) Turbulence in the die b) Smooth flow in one direction

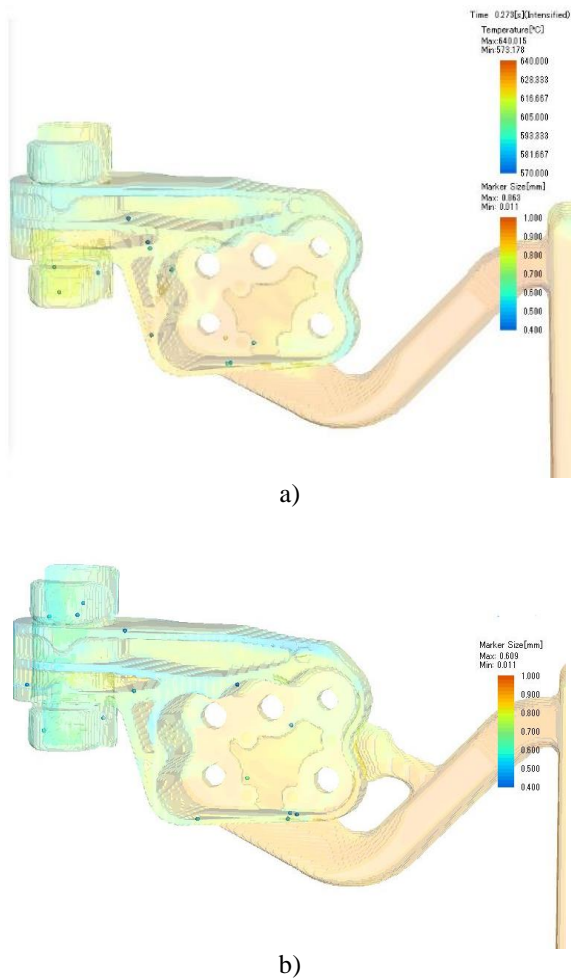


Figure 6. Porosity formation points a) Size and number for single runner design b) Size and number for single runner design

Thus, based on the controls listed in the 5 sub-headings given above, it is clear that it is appropriate to choose the design with single runner and four airflows.

2.3. Detection of the Length of the Switch Point

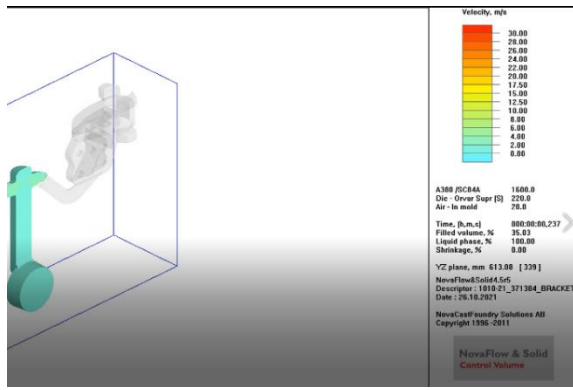
In the HPDC method, the liquid metal fills the die in a total of 3 phases. The 1st phase velocity is the velocity at which the piston first strikes when the automatic ladle transfers the molten alloy to the machine. As the piston transfers the molten alloy into the die, there is a transition from the 1st to the 2nd phase. The place in the transition from the 1st to the 2nd phase is called the switch point and it is the point that needs the most attention in simulation studies. When the injection process passes to the 2nd phase at the switch point, the

molten aluminum takes the shape of the die and the injection ends here. After this stage, the third phase begins. While velocity is an important parameter in the first two phases, the parameter to be considered in the third phase is pressure.

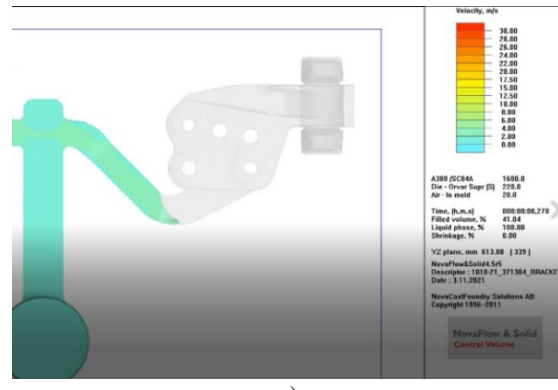
After deciding on the one-way (single runner) design, the next step is to determine the switch point and the speed of the 2nd phase, as known plunger speed also. The material is pushed towards the runner at a slow speed of about 0.25 m/s from the biscuit (1st phase speed). After a filling of approximately 40% and without material entering the main part, the 2nd phase speed is started. The second phase plunger speed is the speed of the piston pushing the material into the die. Injection process is performed at high speed in the 2nd phase speed. In the presented study, simulations were made for 2 different switch point distances. Considering the simulation results, the most appropriate point was determined. Then again, the simulation images were examined and the 2nd phase plunger speed selection was made for the switch point position.

2.3.1 Determination of the Switch Point Location

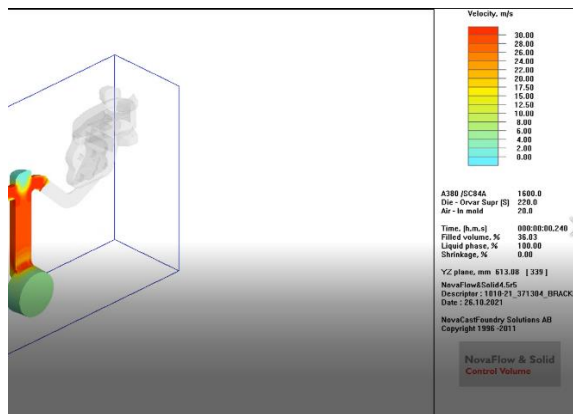
The switch point should be close to where the feeder runner ends and the part entry runner begins. At this point, the injection speed is increased and the second phase is started. The first simulation attempt was made for a 60 mm switch point length and its simulation is shown in figure 7.a. When the switch point is at 60 mm and the system is still at phase 1, the filling volume is approximately 35%. As seen in figure 7.b, when the second phase speed is activated, the first color change occurred for 36% filling volume. At this time, the material has not yet completely filled the runner and the metal has not reached the part inlet. Therefore, 60 mm switch point is not the desired parameter.



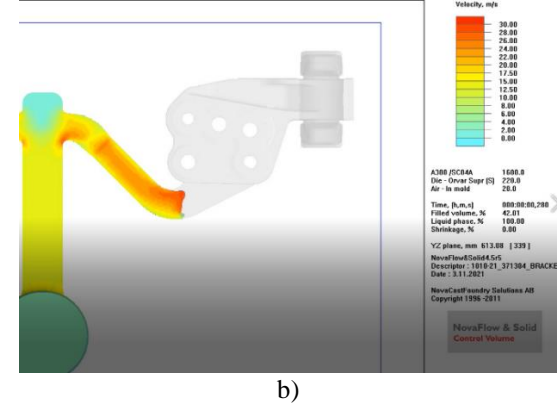
a)



a)



b)



b)

Figure 7. Switch point length simulations a)1st phase for 60 mm b)2nd phase for 60 mm

If the switch point is selected as 70 mm, the filling volume just before switching to the second phase speed is 41%. Moreover, as can be seen in figure 8.a, the runner is almost completely filled with material. At this point, the second phase speed is activated and a color change is observed on the simulation scale. At this point, the filling volume also increased to 42% as shown in figure 8.b. Since the start of the second phase speed should be done when the material is very close to the mold, it is appropriate to choose the switch point as 70 mm.

2.3.2 Determination of 2nd Phase Plunger Speed

The most important parameter in the selection of the second phase speed (plunger speed) is the die filling speed of the metal. While the liquid metal fills the die and takes the shape of the part, there should be no freezing.

Figure 8. Switch point length simulations a)1st phase for 70 mm b)2nd phase for 70 mm

Unexpected freezing will cause incomplete filling of the part. Moreover, there is a risk of porosity and cold bonding. In the presented study, 2 m/sec, 4 m/sec and 6 m/sec speed values were simulated as the plunger speed for the 70 mm switch point as determined before. The simulations are planned to examine the material filling of the die in equal time intervals. Simulation images for 3 different second phase speeds are presented in Figure 9.

Figure 9.a shows the filling simulation for the 2 m/sec second phase speed. It is impossible to fill the die at this speed. Because there are gaps around the pin holes when the filling ratio is at 71%. There is a filling speed of about 15 m/sec in the middle of the piece. However, since the speed around the pin holes is null according to the color scale, there is no material movement and it is not possible to fill those spaces with material. It is inevitable that the freezing or cold joining problem will occur.

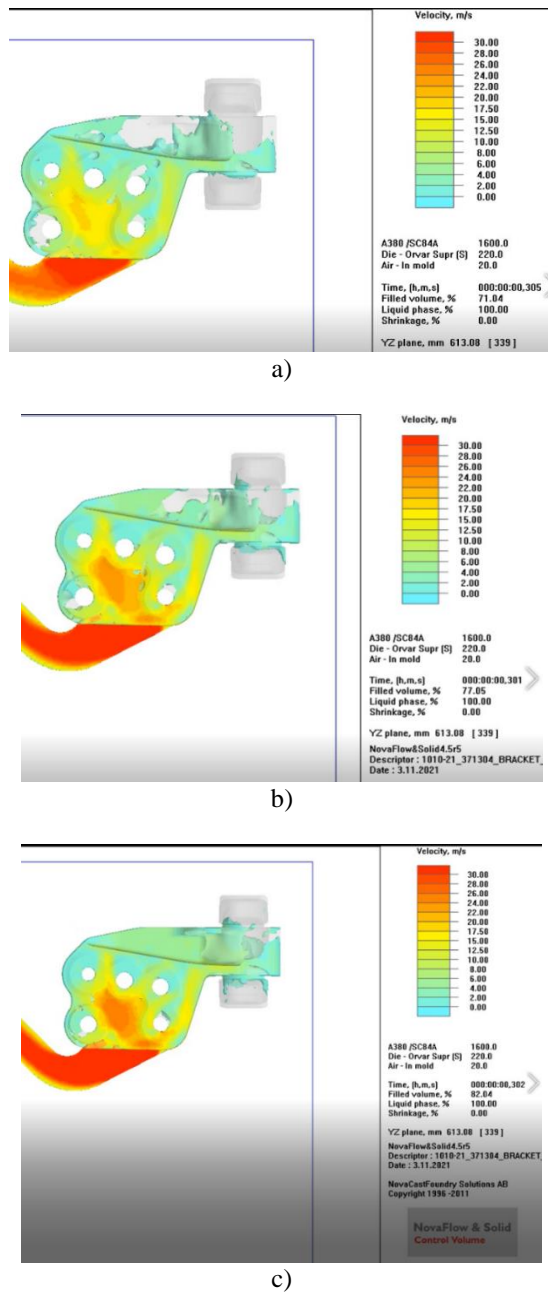


Figure 9. Plunger speed simulations

- a) for 2m/sec plunger speed b) for 4m/sec plunger speed c) for 6 m/sec plunger speed

Since the 2 m/sec second phase speed did not perform a successful filling, a new simulation study was carried out by choosing the second phase speed as 4 m/sec. At this speed, the filling ratio has increased to 77% as seen in Figure 9.b, but there are still places where the material is not filled. The velocity in the middle part of the piece is around 18 m/sec.

However, the near region of the pin holes is still not filled. Moreover, the flow rate here is null. At this speed, the probability of formation of porosity in the part is very high.

The last injection speed trial was performed for 6 m/sec in the same time period as the first two injection speeds. At this speed, the part is almost completely filled with the material as seen in Figure 9.c. The filling ratio is around 82% when evaluated together with the air flows. The material velocity in the middle part of the piece is around 22-24 m/sec, and the near area of the pin holes is mostly filled. There is sufficient material speed in the part for material flow to unfilled areas.

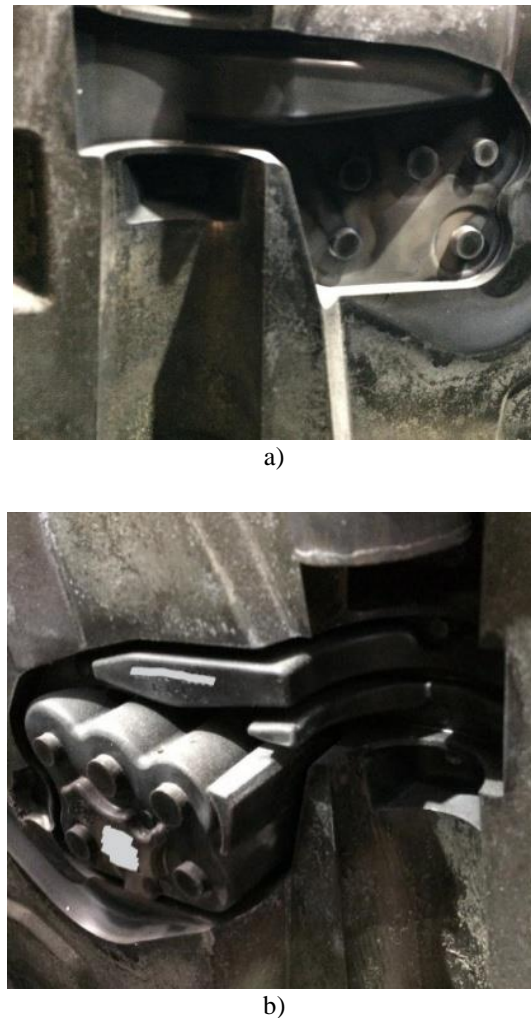


Figure 10. Representation of the die a) fix side of the die b) moving side of the die

3. Manufacturing of the Die and Selection of the Material

In the light of all these data, it was decided that the speed of the second phase, which we can also express as the plunger or injection speed, should be 6 m/s. Based on the simulation results explained above, it was decided that the design would be as single runner. The number of airflows will be four considering the literature information. Two of the air flows are designed to be on the moving side of the die and two on the fixed side of the die. The switch point length was determined as 170 mm in accordance with the simulation images. As a result of the simulation studies, the technical drawing of the die was drawn and manufactured in the appropriate size and geometry, and it is shown in Figure 10.

The experiments were carried out on a 750-ton hot chamber high-pressure injection machine. Al-Si based die casting alloy EN-AC 46000 AlSi9Cu3(Fe) was chosen for the present study. The chemical compositions of the alloy used are presented in Table 1.

Table 1. Chemical composition of grade EN-AC 46000-AlSi9Cu3(Fe) (weight%)

Fe	Si	Mn	Ni	Cr	Ti
max. 1.3	8-11	max. 0.55	max. 0.55	max. 0.15	max. 0.25
Cu	Pb	Mg	Zn	Sn	Al
2-4	max. 0.35	0.05- 0.55	max. 1.2	max. 0.15	remainder

4. Results and Discussion

A sample part produced by the HPDC method is shown in Figure 11. As a result of the naked eye examination, it is seen that the part does not have a region remaining in the mold or sticking to the mold. Moreover, no adverse events such as breakage or freezing were encountered. Thus, the simulation studies were confirmed.



Figure 11. Casted Part

4.1. Radioscopic Examination

As mentioned before, the simulation studies focused on surface quality and porosity. After it was understood that there was no problem in the visual control, it was time for the porosity control process. Porosity analysis was performed on the Yxlon Computed Tomography X-ray device. The examinations were made for regions with a wall thickness of 9.5 mm and more, in accordance with the relevant standards. The aim is to comply with the ASTM E 505 Level 2 standard. Obtained results are presented in Table 2. A small amount of microporosity was seen on the piece and was below the level 2 standard. In addition, cold flow, shrinkage cavity and foreign material determination were not made.

Table 2. Radioscopic examination results

Porosity	Micro porosity. Acceptable for ASTM E 505 LEVEL 2
Cold Flow	No detected any cold flow limit of ASTM E 505 LEVEL 2
Shrinking Cavity	No detected any shrinking cavity limit of ASTM E 505 LEVEL 2
Foreign Material	No detected any foreign material limit of ASTM E 505 LEVEL 2

4.2. Porosity Examination with Microscope

As can be seen in Figure 11, the mounting areas of the cast part, whose wall thickness is less than 9.5 mm, but which must provide a certain strength value, were cut and also porosity analysis was carried out. The section planes and the cut of the parts are shown in Figures 12.a and 12.b. After the cutting process, polishing was done and then porosity determination was started. In this test, the expectation is to find out whether the largest porosity diameter is less than 0.5 mm in regions with a thickness less than 9.5 mm according to ASTM E 505 Level 2. The second important parameter is the ratio of the porosity area to the total area. As a result of the examination, the porosity was found only in the A-A section plane. The results are presented in Table 3.

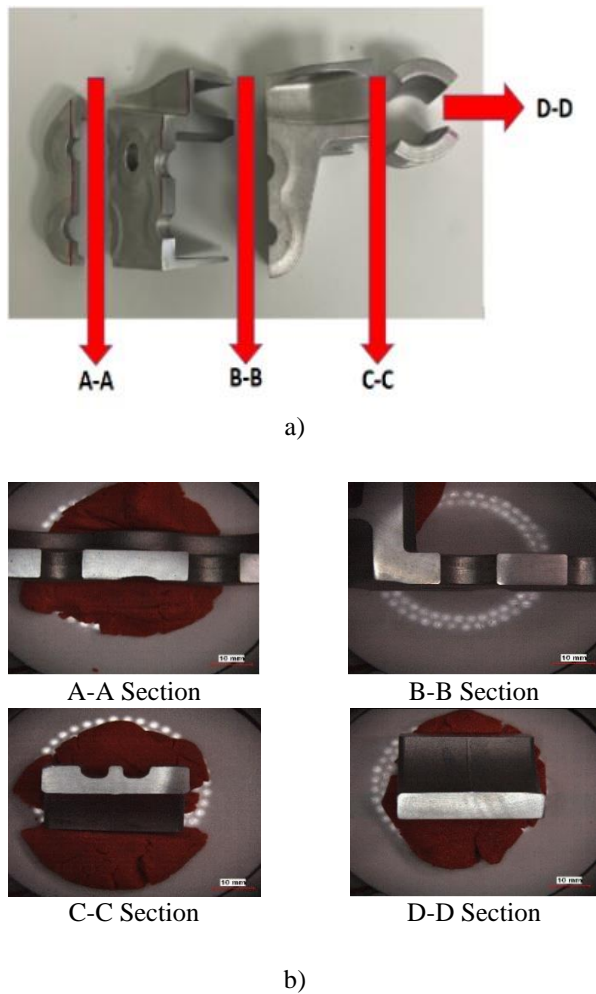


Figure 12. Section planes of the part
a) Cutting directions b) Plane images of all sections

Table 3. Porosity examination results of A-A section

The biggest porosity diameter	0.379 mm
Porosity area	0.1128 mm ²
Total examined area	48.715 mm ²
Ratio	% 0.20

Acknowledgements

The authors especially wish to thank ASLAR PRESS INDUSTRIES and Mr. Kadir ŞİMŞEK for permission of use of NOVAFLOW&SOLID.

Conflicts of Interest Statement

The authors declare that there is no conflict of interest.

REFERENCES

- ASTM E505, 100 Barr Harbor Drive, 1-4, (2011).
- Balikai, V.G., Siddlingeshwar, I.G., & Gorwar, M. (2018). Optimization of process parameters of high pressure die casting process for ADC12 aluminium alloy using Taguchi method. *Int. J. Pure Appl. Math.*, 120(6), 959-969.
- Cho, J.I., Kim, C.W. (2014). The relationship between dendrite arm spacing and cooling rate of Al-Si casting alloys in high pressure die casting. *Int. J. Metalcast.*, 8 (1), 49-55.
- Doğan, A. (2019). *Investigation of the effect of different air venting methods on porosity and process efficiency in the high pressure die casting process of aluminum alloys*. MSc. Thesis, (in Turkish).
- Dumanic, I., Jozic, S., Bajic, D. & Krolo, J. (2021). Optimization of Semi-solid high-pressure die casting process by computer simulation, Taguchi method and grey relational analysis. *Int. J. Metalcast.* 15 (1), 108-118.
- Gökçil, E. (2019). *Determination of optimum die design and process parameters with simulation*

- technique in high pressure die casting of aluminum alloys*. MSc. Thesis, (in Turkish).
- Gunasegaram, D.R., Givord, M., O'Donnell, R.G. & Finnin, B.R. (2013). Improvements engineered in UTS and elongation of aluminum alloy high pressure die castings through the alteration of runner geometry and plunger velocity. *Mater. Sci. Eng. A*. 559, 276-286.
- Hu, Q., Zhao, H. & Li, F. (2017). Microstructures and properties of SiC particles reinforced aluminum-matrix composites fabricated by vacuum-assisted high pressure die casting. *Mater. Sci. Eng., A* 680, 270-277.
- Karthik, A., Karunanithi, R., Srinivasan, S.A. & Prashanth, M., (2020). The optimization of squeeze casting process parameter for AA2219 alloy by using the Taguchi method. *Mater. Today: Proc.* 27 (Part 3), 2556-2566.
- Kenar, O. (2019). *Investigation of the effects of die design modifications on casting part quality in aluminum automotive parts produced by high pressure die casting process*. MSc. Thesis, (in Turkish).
- Kwon, H.J., Kwon, H.K. (2019). Computer aided engineering (CAE) simulation for the design optimization of gate system on high pressure die casting (HPDC) process. *Robot. Comput. Integr. Manuf.* 55, 147-153.
- Li, X., Xiong, S.M. & Guo, Z. (2016). Correlation between porosity and fracture mechanism in high pressure die casting of AM60B alloy. *J. Mater. Sci. Technol.* 32 (1), 54-61.
- Li, X., Xiong, S.M. & Guo, Z. (2016) Improved mechanical properties in vacuum-assist high-pressure die casting of AZ91D alloy. *J. Mater. Process. Technol.* 231, 1-7.
- Lu, Y., Taheri, F., Gharghoury, M.A. & Han, H.P. (2009). Experimental and numerical study of the effects of porosity on fatigue crack initiation of HPDC magnesium AM60B alloy. *J. Alloys Compd.* 470, 202-213.
- Nagasankar, P., Sathiyamoorthy, V., Gurusamy, P., VinothKanna, P., Manibharathi, D. & Srikanth, P. (2018). Reduction of blowholes in aluminium high pressure die casting machine. *Int. J. Eng. Technol.* 7 (334), 410-413.
- Niu, X.P., Hua, B.H., Pinwill, I. & Li, H. (2000). Vacuum assisted high pressure die casting of aluminium alloys. *J. Mater. Process. Technol.* 105(1-2), 119-127.
- Patel, G.C.M., Krishna, P. & Parappagoudar, M.B. (2014). Optimization of squeeze cast process parameters using taguchi and grey relational analysis. *2nd International Conference on Innovations in Automation and Mechatronics Engineering, Proc. Technol.* 14, 157-164.
- Teng, X., Mae, H., Bai, Y. & Wierzbicki, T. (2009). Pore size and fracture ductility of aluminum low pressure die casting. *Eng. Fract. Mech.* 76 (8), 983-996
- Tsoukalas, V.D. (2003). The effect of die casting machine parameters on porosity of aluminium die castings. *Int. J. Cast Met. Res.* 15, 581-588.
- Zhou, Y., Guo, Z. & Xiong, S.M. (2019). Effect of runner design on the externally solidified crystals in vacuum die-cast Mg-3.0Nd-0.3Zn-0.6Zr alloy. *J. Mater. Process. Technol.* 267, 366-375.

VIDEO DOSYALARI ÜZERİNDE LSB YÖNTEMİYLE BİLGİ GİZLEME İŞLEMİNİN SIRALI VEYA RASTGELE YAPILMASININ GÜVENLİĞE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Egemen TEKKANAT¹, Andaç ŞAHİN MESUT²

¹ Trakya Üniversitesi, Keşan Yusuf Çapraz Uygulamalı Bilimler Yüksekokulu, Bilişim Sistemleri ve Teknolojileri Bölümü, Keşan / Edirne / Türkiye

² Trakya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Edirne / Türkiye

Makale Künye Bilgisi: Tekkanat, E., Mesut, A.Ş. (2022). Video dosyaları üzerinde LSB Yöntemiyle Bilgi Gizleme İşleminin Sıralı veya Rastgele Yapılmasının Güvenliğe Etkilerinin İncelenmesi. *Trakya Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 23(1), 37-49.

Öne Çıkanlar

- Bilgi Gizleme ve Şifreleme teknikleri veri güvenliği için önemlidir.
- Veri gizleme farklı özellikteki dijital ortamlara uygulanarak veri güvenliği, telif hakkı, kimlik kanıtlama gibi işlevleri sağlamak amacıyla kullanılabilir.
- Video dosyalarında veri gizlemek için en sık kullanılan yöntemlerden olan LSB yöntemi sıralı veya rastgele uygulanabilir.

Makale Bilgileri	Öz
Makale Tarihiçesi: Geliş: 13 Mayıs 2022 Kabul: 6 Haziran 2022	Teknolojinin hızlı gelişimi ile birlikte bilgi güvenliği kavramı önemli bir konu haline gelmiştir. Özellikle dijital ortamda gerçekleştirilen veri transferleri sırasında verilerin güvenliğini sağlayabilmek için Kriptoloji ve Steganografi kavramına ihtiyaç duyulmaktadır. Kriptoloji bilgiyi anlamsız hale getirmek için kullanılırken Steganografi var olan bilgiyi taşıyıcı dosyalar üzerine saklamak için kullanılmaktadır. Bu çalışmada video dosyaları üzerine LSB yöntemi kullanılarak sıralı ve rastgele bilgi gizleme işlemleri gerçekleştirilmiş ve analizleri yapılmıştır.
Anahtar Kelimeler: Video steganografi; En önemsiz bite ekleme yöntemi; Steganaliz	

INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF SEQUENTIAL OR RANDOM HIDING OF INFORMATION ON VIDEO FILES USING THE LSB METHOD ON SECURITY

Article Info	Abstract
Article History: Received: May 13, 2022 Accepted: June 6, 2022	With the rapid development of technology, the concept of information security has become an important issue. The concept of Cryptology and Steganography is needed to ensure the security of data, especially during data transfers in digital environment. While cryptography is used to render information meaningless, Steganography is used to store existing information on carrier files. In this research, sequential and random information hiding processes were performed on video files by using the LSB method, and their analyzes were made.
Keywords: Video Steganography; LSB Insertion Method; Steganalysis	

1. Giriş

Kişisel bilgilerin gizlenmesi ve gizli haberleşme insanlığın en eski dönemlerinden beri var olan bir kavramdır. Çağın gereksinimleri doğrultusunda insanoğlu çeşitli sebeplerden dolayı gizli haberleşme yöntemlerini tercih etmişlerdir. İnternet ve paralel teknolojik gelişmeler çağımızın en önemli getirilerindedir. Özellikle İletim hızının artması ile bilgisayar sistemlerinin güvenliği ve bilgi güvenliği konuları oldukça önem kazanmıştır. İnternetin birçok kişi tarafından kolayca erişilebilmesi nedeniyle metin, resim, ses, video vb. gibi birçok bilgi ve mesajlar içeren dosyaların ağ üzerinden paylaşımı önemli ölçüde artmıştır. Paylaşılan bu ortamların güvenliğini sağlayabilmek için bilgileri şifreleme ve bilgileri gizleme teknikleri güvenlik açıklarını kapatmak için geliştirilmiş ve uygulanmaya başlanmıştır.

Birbiri ile haberleşen kişiler arasındaki iletişime dışarıdan üçüncü kişiler tarafından erişilebilmekte ve bu süreç sırasında eriştiği verileri değiştirebilmektedir. Bu da haberleşme sürecinin hatalı olmasına sebep olabilmektedir. Bu süreçte bilgi güvenliği konusu oldukça ciddi bir konudur. Bilgilere erişip bunları değiştirebilme süreçlerine karşılık çeşitli koruma ve önleme mekanizmaları geliştirilmiştir. Şifreleme ve bilgi gizleme bu mekanizmalarının en önemli parçalarından birileridir.

Şifreleme gizlenecek verilerin anahtarlar yardımı ile anlaşılması zor hale getirilmesini ifade ederken bilgi gizleme ise bilgileri elde etmek isteyen üçüncü kişilerden bilgileri saklamak amacı ile kullanılmaktadır. Bu iki mekanizma başlı başına güvenlik sağlayabildikleri gibi birlikte kullanıldıklarında ise güvenlik özellikleri artmaktadır.

Bu iki mekanizma birlikte kullanıldığında iletişim güvenli bir hale gelebilmektedir.

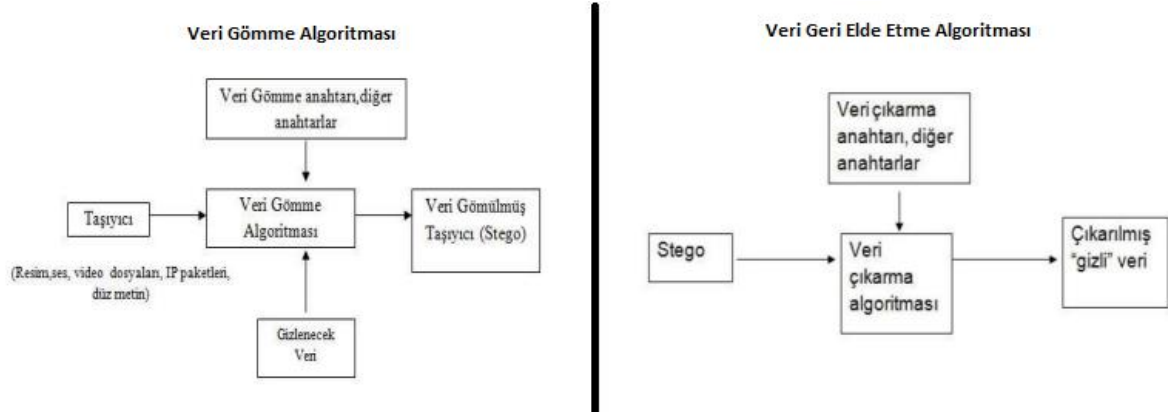
Bilgi gizleme birçok alt alandan oluşmaktadır. Bu sınıflandırma bilgi gizleme alanında yapılan ilk bilimsel toplantıda kabul edilmiştir (Pfitzmann B, 1996)

Bu çalışmada bilgi gizlemenin bir alt disiplini olan steganografi yöntemlerinin video dosyaları üzerinde uygulanması incelenmiştir. Hareketli görüntü dosyaları (video) üzerinde bilgi gizlemek amacıyla kullanılan LSB yöntemi incelenmiş ve bunun için bir uygulama geliştirilmiştir. Veri gizleme işlemleri sıralı ve rastgele şekilde yapılmış ve bunların etkinlikleri değerlendirilmiştir.

2. Steganografi

Temeli antik çağlara kadar dayanan eski bir bilgi gizleme sanatı olan Steganografi biliminin temel çıkış amacı, gizli haberleşmenin üçüncü kişiler tarafından fark edilmeden iletilmesidir. Steganografi iki parçadan oluşan Yunanca bir kelimedir. “Steganos” örtülü/gizli, “graphy” ise yazım/çizim anlamına gelmektedir (Cox, I. J., Miller, M. L., Bloom, J. A ,2000). Kelime kökeni Yunancadan gelmektedir ve tam olarak anlamı “örtülmüş yazı” demektir (Neil F.Johnson,1998). Steganografi bilgi gizlemenin bir alt dalıdır.

Steganografi tekniklerinde içine bilgi gizlenen ortama örtü verisi (cover-data) veya örtü nesnesi (cover-object) ve oluşan ortama ise stego-metin (stego-text) ya da stego-nesnesi (stego-object) denilmektedir. Bilginin saklanması işlemi ve aynı zamanda saklanan bilginin geri elde edilmesini zorlaştırmak adına bir stego-anahtar kullanılmaktadır. (Hu, S. D. ,2011).



Şekil 1. Steganografik Sistem

Steganografi ses, metin, görüntü vb. ortamdaki verilerin korunması için kullanılan bir disiplin olarak tanımlanmaktadır. Metin Steganografide bilgi gizlemek için kullanılan ortam basılı ya da dijital ortamdaki metin dosyalarıdır. Metin dosyasındaki verileri gizlemek için farklı yöntemler kullanılabilir (Akyüz, D., & Kasapbaşı, M. C. 2021). Genellikle, bu yöntemlerin veri saklama kapasiteleri düşük seviyededir. Ayrıca metin dosyaları üzerindeki değişikliklerin kolay algılanabilmesi nedeniyle dikkatlice uygulanması gerekmektedir. Bu sebeple uygulanması zor bir veri gizleme şeklidir.

Resim Steganografi tekniğinde gizleme işleminde görüntü dosyaları kullanılmaktadır. Görüntü dosyaları iletim ortamlarında oldukça fazla kullanıldığı için ve iletimleri özellikle internet üzerinden kolay olduğu için steganografik sistemlerde en sık uygulandığı formatlardır. İletiminin kolay olmasının yanı sıra yaygın olarak kullanılmasını bir sebebi de kapasite özelliğidir (Avcı, E., Tuncer, T., & Ertam, F., 2014).

Görüntü dosyaları üzerinde bilgi işleme sırasında kullanılan anahtar kavramı gizlenecek mesajın güvenilirliği sağlamaktadır. Kullanılan bu anahtar ile gizlenmesini istediğimiz verinin gömülme noktaları tespit edilmektedir. Güvenirliliği sağlamak amacı ile kullanılan bu anahtar şifreleme amacı ile kullanılabilir (Şahin Mesut A., Mesut A., Sakallı M.T.,2010).

Ses Steganografi tekniğinde ses dosyaları üzerinde bilgi gizleme işlemi yapılmaktadır. İnsan işitme sistemi frekans aralığı sebebi ile ses sinyalleri içine bilgi gizleme işlemi uygulanması uğraş gerektiren bir alandır (Şahin, A., 2007).

İnsan işitme sistemi sesleri 109:1'den büyük bir güç aralığında ve 103:1'den büyük bir frekans aralığında algılar. HAS (Human Auditory System)'in beyaz Gauss gürültüsüne (AWGN) duyarlılığı da yüksektir; bir ses dosyasındaki bu gürültü, ortam seviyesinin altında 70 dB kadar düşük tespit edilebilir (Nosrati, M., Karimi, R., & Hariri, M., 2012).

Ses Steganografinin dikkatli şekilde gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Ses steganografide kullanılan yöntemler diğer alanlarda kullanılan yöntemlere göre daha karmaşıktır (Al-Othmani, A. Z., Manaf, A. A., & Zeki, A. M.,2012).

3. Video Steganografi

Video Steganografi, bir videonun içinde bazı gizli bilgileri gizleme işlemidir. Bu bilgilerin videoya eklenmesi, piksel rengindeki değişiklik ihmal edilebilir düzeyde olduğundan insan gözü tarafından tanınmaz.

Video steganografi resim steganografinin genişletilmiş hali gibidir. Farklı noktaları olarak ise video dosyası dinamiktir. Veri gizlenen resmi video içerisinde bulmak bu yüzden daha zordur. Video steganografide

daha fazla saldırı olanağı bulunmaktadır. Bunlar kayıplı sıkıştırma, çerçeve (frame) oranı değiştirme, format değişimi, video işleme sırasında çerçeve ekleme ve çıkarma gibi yöntemlerdir. Video dosyaları çok sayıda resim dosyasının birleştirilmiş hali olduğu için veri saklama kapasitesi daha fazladır.

Video steganografi yöntemleri sıkıştırılmış ve Sıkıştırılmamış (ham) videolar üzerinde uygulanabilir. Video üzerinde veri gizleme yapan algoritmalar gömme alanı açısından da iki şekilde uygulanır. Bunlar Mekânsal Alan teknikleri ve Alan dönüştürme teknikleridir (Hacımurtazaoğlu, M, 2022).

Sıkıştırılmamış videolar üzerinde uygulanan Düzensiz dikdörtgen bölümlenmesi (Non - Uniform rectangular partition) yönteminde ana video içerisine sıkıştırılmamış bir video saklanması şeklindedir. Bu aşamada dikkat edilmesi gereken nokta ise gizlenecek video ile örtü videosunun aynı boyutlarda olmasıdır. Bu yöntemin uygulanmasında ayrıştırılan kodlar şifrelenerek örtü videosunda yer alan her karenin en önemsiz dört bitine saklanarak gerçekleştirilmektedir (Hu, S. D. ,2011).

Sıkıştırılmış videolar üzerinde uygulanan yöntemlerde veriler I çerçevesi alanına P, B alanlarındaki maksimum hareket vektörleri ve maksimum kare değişimiyle gömülebilir. En yüksek performans olarak ise AVC kodlama tekniği ile oluşturulan videolarda ulaşılmaktadır (Misman, C. ,2018).

Mekânsal Alan tekniklerinin en yaygın olarak kullanılanı En Önemsiz Bite Ekleme (Least Significant Bit Insertion – LSB) yöntemidir. Uygulanması en kolay ve yaygın olarak kullanılmakta bir teknik olmakla beraber dikkatsiz kullanılması durumunda veri kayıpları ortaya çıkabilmektedir. Bu yöntemde; resim yapısı içerisinde yer alan piksellerdeki byte' ların en önemsiz bitlerinin yerine gizlenecek olan bilgilerin bitleri sırasıyla başlangıcından itibaren teker teker yerleştirilmektedir (Şahin, A., Buluş, E., & Tolga

Sakallı, M. ,2006). İletişimin daha güvenli olması adına saklanacak olan veriler RSA ve AES gibi şifreleme metotları ile de desteklenebilmektedir. Bu yöntemin tek dezavantajı kapasite sınırı olmasıdır yani gönderilecek mesaj ya da dokümanın uzunluğu taşıyıcı medya uzunluğuna bağlıdır. Bu yöntemde gizli bilgi bilgilerin sıralı ya da rastgele şekilde saklanabilir. Bunlardan birincisinde resim üzerinde sıralı şekilde gizleme yapma işlemi, ikincisinde ise rastgele gizleme fonksiyonu üreterek belirlenen bir pikselde gizleme yapmak şeklindedir. Güvenliği arttırmak için ise Stego-anahtar (stego-key) kullanılmaktadır. Anahtar kullanmanın avantajı Şifre çözme işlemi esnasında ortaya çıkmaktadır. Anahtara sahip olmayan kimse gizli mesaj elde edilememektedir.

Alan dönüştürme tekniklerinde de çeşitli dönüşüm fonksiyonları kullanılmakta ve frekans düzlemde veri gizleme işlemleri gerçekleştirilmektedir.

4. Gereç ve Yöntem:

Bu çalışmada AVI formatındaki video dosyaları üzerine bilgi gizleme işlemi için MATLAB programı ile bir uygulama geliştirilmiştir. Gerçekleştirilen uygulamada en önemsiz bite ekleme yöntemi kullanılmış ve güvenliği arttırmak için AES ve RSA şifreleme teknikleri kullanılmıştır. Video üzerinde gizlenecek bilgiler sıralı ve rastgele olarak iki farklı şekilde gizlenmektedir.

Sıralı gizleme yönteminde veri her bite 0. bitten başlayarak bit uzunluğu kadar saklanır. Rastgele gizleme yönteminde ise bir algoritma mevcuttur.

Bu algoritma:

$$f = (ax + b) \bmod c \text{ şeklindedir.}$$

x: gizlenecek bit

c: frame sayısı

a ve b: asal sayılar

Bu algoritma ile gizlenecek olan veriler video çerçeveleri üzerinde rastgele olarak dağıtılmaktadır.

Gizleme işlemleri içerisinde var olan algoritmayı güçlendirmek ve gizlenen bilginin anlaşılır olmasını engellemek amacıyla şifreleme yöntemleri kullanılmıştır. Bu yöntemler simetrik şifreleme algoritması olan AES ve asimetrik şifreleme algoritması olan RSA şifrelemesidir.

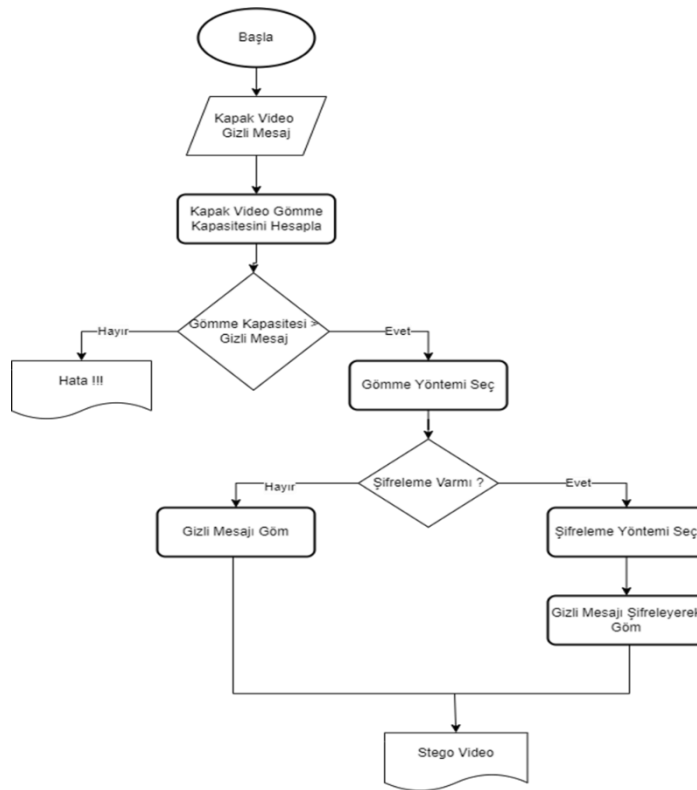
RSA şifreleme algoritması asimetrik bir şifreleme algoritmasıdır ve 1978 yılında Ron Rivest, Adi Shamir ve Leonard Adleman tarafından geliştirilmiştir. RSA'nın mantığı iki asal sayının çarpımından oluşan tamsayılara dayanmaktadır. Bu algoritmanın güvenliği ise kullanılan iki asal sayının büyüklüğü ile ilgilidir (Rivest, R. L., Shamir, A., & Adleman, L. (1978)).

Simetrik bir şifreleme algoritması olan AES, kabul edilmiş bir şifreleme standardıdır. AES algoritması

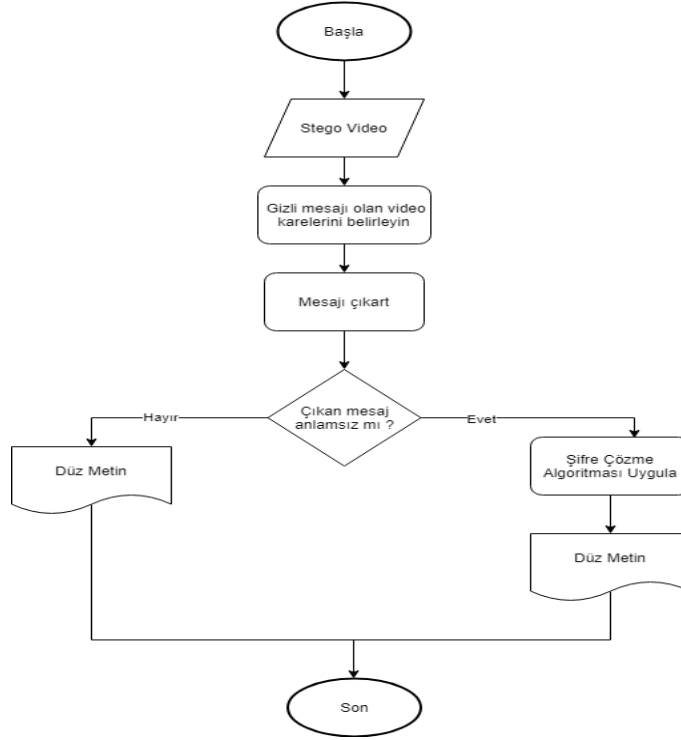
şifreleme ve şifre çözme işlemlerinde aynı anahtarı kullanmaktadır. DES algoritmasına göre daha hızlı ve güvenli olan AES algoritmasında girdi ve çıktı matrisleri her zaman 128 bit olmak zorundadır. Anahtar uzunlukları 128, 192 veya 256 bit olabilmektedir. AES algoritmasının yapısı genel anlamda iki farklı bloktan oluşmaktadır. Bu bloklardan ilki tur dönüşüm diğer blok ise anahtar üretim bloğudur. Algoritma tekrarlı bir yapıya sahiptir (Doğan, A. Y. , 2008).

Yapılan gizleme işlemleri sırasında orijinal video ile bilgi gizlenmiş videolar arasında bir boyut farkı oluşmamaktadır.

Şekil 2'de video dosyaları üzerinde önerilen gömme algoritmasının uygulanması gösterilmiştir. Şekil 3'te ise video dosyaları üzerinde önerilen veri çıkartma algoritmasının uygulanması gösterilmiştir.



Şekil 2. Önerilen Gömme İşleminin Algoritması



Şekil 3. Gizli Veriyi Elde Etme İşleminin Algoritması

Steganografik bir algoritma incelenirken genellikle üç temel unsur göz önünde bulundurulur. Bu unsular dayanıklılık, saklanabilen veri miktarı ve değişimin fark edilememesidir (Çimen, C., Akleyek, S. ve Akyıldız, E. ,2007). Taşıyıcıda ne kadar değişim olduğu steganografi bir algoritma için oldukça önemlidir. Taşıyıcıdaki değişimi ya da verideki bozulma oranının belirlenmesi için çeşitli ölçme yöntemleri mevcuttur. Bunlar arasında en bilinenleri; MSE, RMSE ve PSNR'dır. MSE hataların kareleri toplamının ortalamasıdır. Görüntü dosyalarında gerçek ve ideal piksel değerleri arasındaki ortalama kare farkını ölçmek için kullanılmaktadır.

MSE genellikle σ^2 olarak gösterilir. MSE değerinin sıfıra yakın olması iyi bir performans olduğunu ifade eder MSE'nin karekökü ise RMSE'dir (Sayood, 1996).

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (x_n - y_n)^2$$

PSNR tanım olarak en yüksek sinyal gürültü oranı anlamına gelmektedir. Bir sinyalin sahip olduğu maksimum gücü ile sinyalin gürültüsü arasındaki oranı hesaplamak için kullanılan bir metriktir. Bazı durumlarda Ortalama Kare Hata (MSE) yerine bu metrik tercih edilebilmektedir, PSNR, genel olarak sıkıştırılmış görüntülerin kalitesini ölçmek için tercih edilmektedir (Sayood, 1996).

$$PSNR(dB) = 10 \log_{10} \frac{x_{peak}^2}{\sigma_d^2}$$

Steganografik sistemlerde bilgi gizlenen görüntü dosyalarında RGB değerleri değiştirildiği için renk yoğunlukları da değişmekte ve bu da önemli bir konu haline gelmektedir. Histogram kavramı piksellerdeki renk bileşenlerinin dağılımları göstermektedir. Histogram analizleri bilgi gizlendikten önceki ve bilgi gizlendikten sonraki görüntüler arasındaki bu farkı ortaya koyabilmektedir.

5. Bulgular ve Tartışma

Video dosyaları üzerinde gizleme işlemleri birçok farklı video dosyasında uygulanmıştır. Sıralı ve rastgele bilgi gizleme işlemlerinin değerlendirilmesi amacıyla taşıyıcıdaki değişim ölçülmüş ve histogram analizi yapılmıştır.

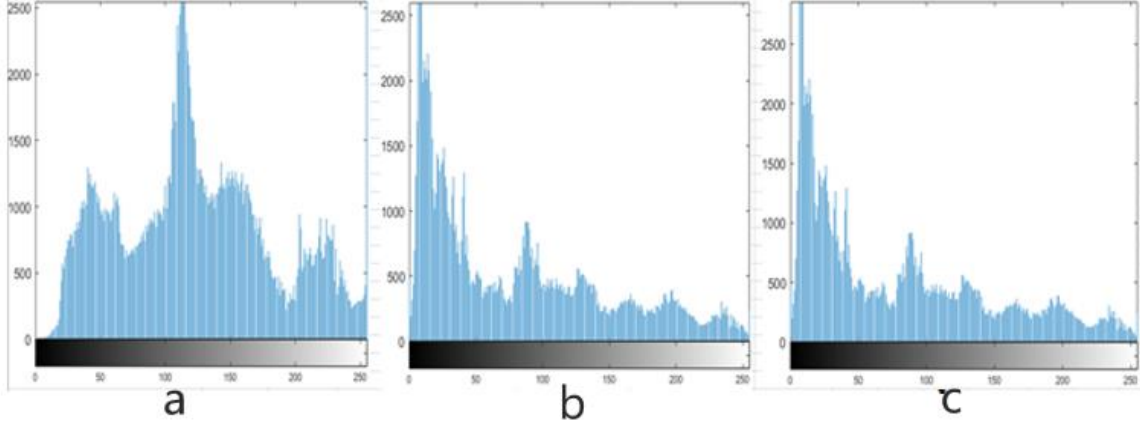
Örnek olarak iki adet video seçilmiş ve taşıyıcıdaki değişimleri ölçebilmek amacıyla MSE ve PSNR değerleri elde edilmiştir. Bu sonuçlar tablo 1 ve tablo 2 de gösterilmiştir. Video dosyaları üzerinde bilgi gizleme işlemlerindeki metinlerin boyutları 0,1 KB ile 450 KB arasında değişmektedir.

Tablo 1. Video 1 için elde edilen MSE ve PSNR değerleri

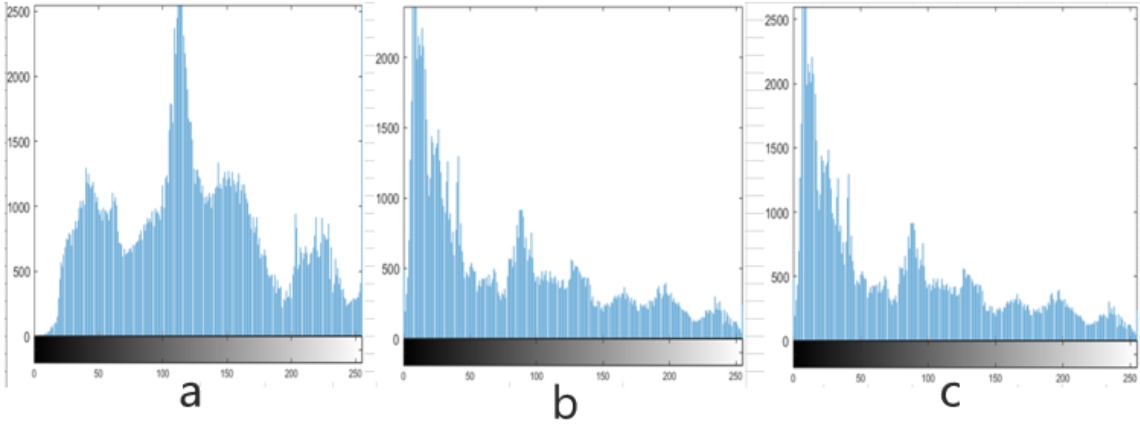
Sıralı Gizleme			Rastgele Gizleme		
	MSE	PSNR		MSE	PSNR
450 KB	5.553	55,3612	450 KB	5.581	55.352
200 KB	5.552	55,3611	200 KB	5.580	55.351
116 KB	3.258	57.668	116 KB	3,217	57.660
60 KB	1.621	60.687	60 KB	1.634	60.672
30 KB	0.7759	63.886	30 KB	0.7798	63.881
12 KB	0.4721	66.056	12 KB	0.4735	66.055
10 KB	0.2803	68.323	10 KB	0.2807	68.331
7.5 KB	0.2196	69.384	7.5 KB	0.2195	69.394
6 KB	0.1818	70.200	6 KB	0.1825	70.202
4 KB	0.1118	72.306	4 KB	0.1116	72.327
3 KB	0.0998	72.794	3 KB	0.0999	72.812
2 KB	0.0562	75.264	2 KB	0.0565	75.289
1 KB	0.0310	77.836	1 KB	0.0321	77.780
0.6 KB	0.0175	80.334	0.6 KB	0.1795	80.289
0.3 KB	0.0095	82.961	0.3 KB	0.0098	82.942
0.1 KB	0.0035	87.226	0.1 KB	0.0035	87.408

Tablo 1’de Video 1 dosyası üzerine yapılan gizleme işlemi sonucunda girilen veri boyutu değiştikçe MSE ve PSNR değerlerindeki değişim gözükmektedir. Veri boyutu büyüdükçe MSE değeri artmakta PSNR değeri ise azalmaktadır. Video 1 dosyasının boyutu 7.99 MB’dır.

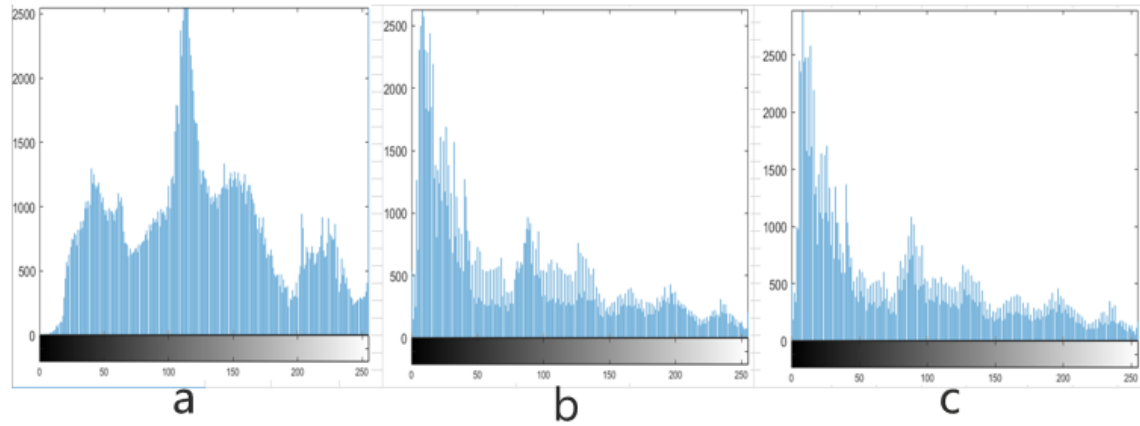
Aşağıda Video1 dosyasına sırasıyla 0,1 KB, 30 KB, 120 KB ve 400 KB gizlendiğinde oluşan histogram grafikler verilmiştir. Gizleme işlemi sıralı ve rastgele olacak şekilde ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir.



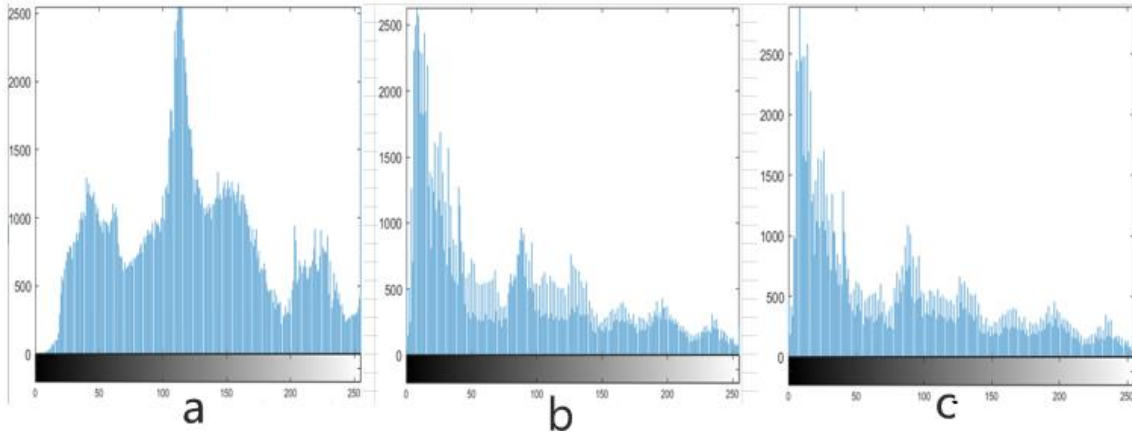
Şekil 4. (a) Veri gizlenmemiş orijinal Video1 dosyasının histogram grafiği (b) Video 1 dosyasına sıralı olarak 0,1 KB veri gizlendiğinde oluşan histogram grafiği (c) Video 1 dosyasına rastgele olarak 0,1 KB veri gizlendiğinde oluşan histogram grafiği



Şekil 5. (a) Veri gizlenmemiş orijinal Video1 dosyasının histogram grafiği (b) Video 1 dosyasına sıralı olarak 30 KB veri gizlendiğinde oluşan histogram grafiği (c) Video 1 dosyasına rastgele olarak 30 KB veri gizlendiğinde oluşan histogram grafiği



Şekil 6. (a) Veri gizlenmemiş orijinal Video1 dosyasının histogram grafiği (b) Video 1 dosyasına sıralı olarak 120 KB veri gizlendiğinde oluşan histogram grafiği (c) Video 1 dosyasına rastgele olarak 120 KB veri gizlendiğinde oluşan histogram grafiği



Şekil 7. (a) Veri gizlenmemiş orijinal Video1 dosyasının histogram grafiği **(b)** Video 1 dosyasına sıralı olarak 450 KB veri gizlendiğinde oluşan histogram grafiği **(c)** Video 1 dosyasına rastgele olarak 450 KB veri gizlendiğinde oluşan histogram grafiği

Şekil 4'te Video 1 üzerinde 0,1 KB lık veri gizleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Gizlenen veri miktarı çok düşük olduğu için orijinal dosya ile sıralı veya rastgele gizleme sonucunda elde edilen histogram grafiklerinde farkedilebilir bir değişim olmadığı gözlenmiştir.

Şekil 5'te ise Video 1 üzerinde 30 KB lık veri gizleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Gizleme işlemi yapıldıktan sonra orijinal dosyanın histogramı ile Sıralı veya rastgele gizleme sonucunda elde edilen histogramlar arasında fark olduğu gözükmemektedir. Orijinal dosyanın elimizde olduğu durumda yapılan bir histogram analizi sonucunda gizli bilginin var olduğu anlaşılabilir. Sıralı yada rastgele gizleme histogramları arasında çok gözle görülür bir fark yoktur.

Şekil 6'da Video 1 üzerindeki 120 KB lık veri gizleme işlemi gerçekleşmiştir. Orijinal ve veri gizlenmiş videoların histogramları arasındaki fark iyice belirginleşmiştir. Bu büyüklükte bir veri gizlendiğinde sıralı ya da rastgele gizleme sonucunda oluşan histogram grafikleri de farklılaşmaya başlamaktadır.

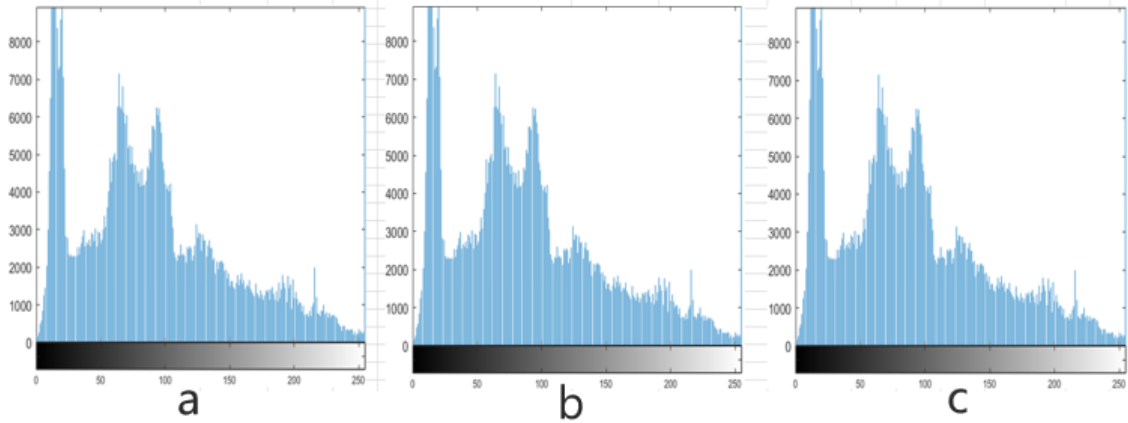
Şekil 7'de ise video 1 üzerinde 450 KB lık veri gizleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen histogram grafiklerindeki değişimlerin çok fazla olduğu gözlemlenmiştir.

Gizleme işlemlerinde 120 KB lık ve üzeri veri gizleme yapıldıktan sonra histogram grafiklerindeki değişim daha net gözükmemektedir.

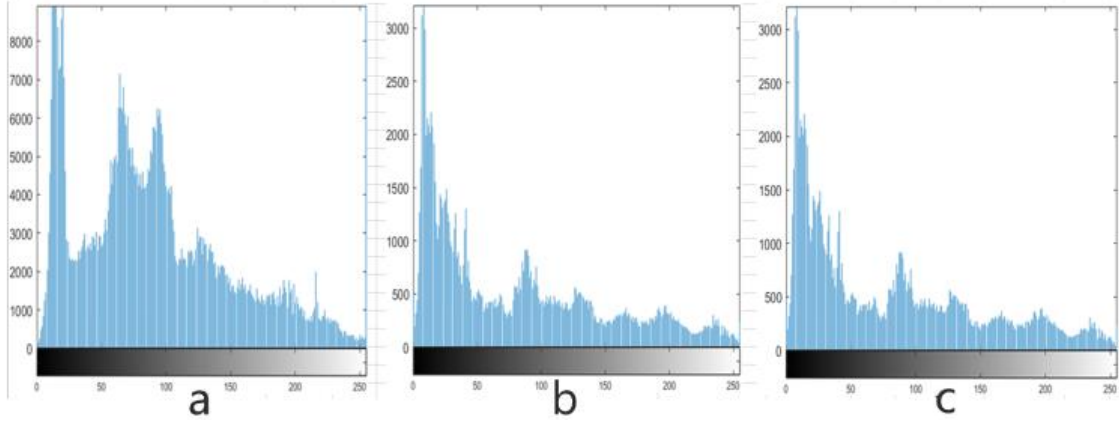
Tablo 2 de örnek olarak seçilen bir diğer video dosyası olan Video 2 dosyası üzerine yapılan gizleme işlemi sonucunda elde edilen PSNR ve MSE değerleri verilmiştir. Artan veri miktarı nedeniyle bu değerlerdeki değişimler gözlenmiştir. Veri boyutu büyüdükçe MSE değeri artmakta PSNR değeri ise azalmaktadır. Video 2 dosyasının boyutu 5.99 MB dır.

Tablo 2. Video 2 için elde edilen MSE ve PSNR değerleri

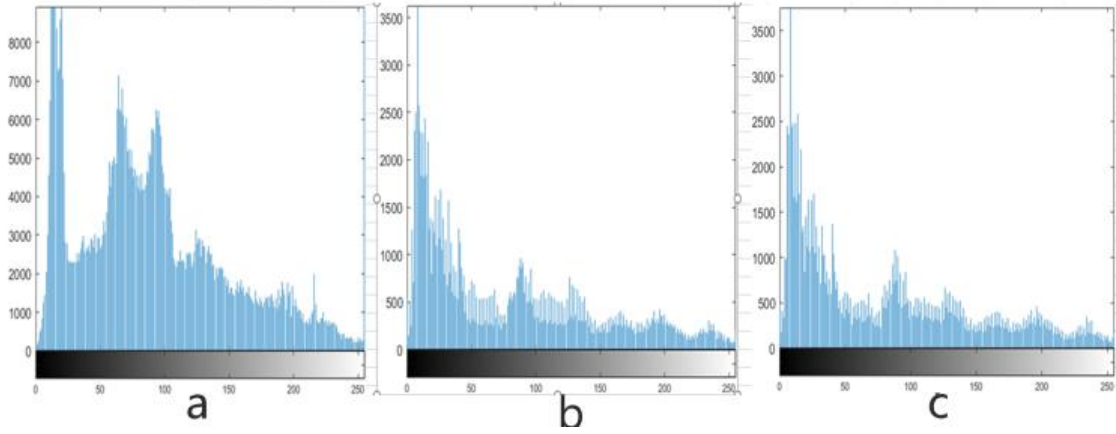
Sıralı Gizleme			Rastgele Gizleme		
	MSE	PSNR		MSE	PSNR
450 KB	5.553	55,3612	450 KB	5.581	55.352
200 KB	5.552	55,3611	200 KB	5.580	55.351
116 KB	3.258	57.668	116 KB	3,217	57.660
60 KB	1.621	60.687	60 KB	1.634	60.672
30 KB	0.7759	63.886	30 KB	0.7798	63.881
12 KB	0.4721	66.056	12 KB	0.4735	66.055
10 KB	0.2803	68.323	10 KB	0.2807	68.331
7.5 KB	0.2196	69.384	7.5 KB	0.2195	69.394
6 KB	0.1818	70.200	6 KB	0.1825	70.202
4 KB	0.1118	72.306	4 KB	0.1116	72.327
3 KB	0.0998	72.794	3 KB	0.0999	72.812
2 KB	0.0562	75.264	2 KB	0.0565	75.289
1 KB	0.0310	77.836	1 KB	0.0321	77.780
0.6 KB	0.0175	80.334	0.6 KB	0.1795	80.289
0.3 KB	0.0095	82.961	0.3 KB	0.0098	82.942
0.1 KB	0.0035	87.226	0.1 KB	0.0035	87.408



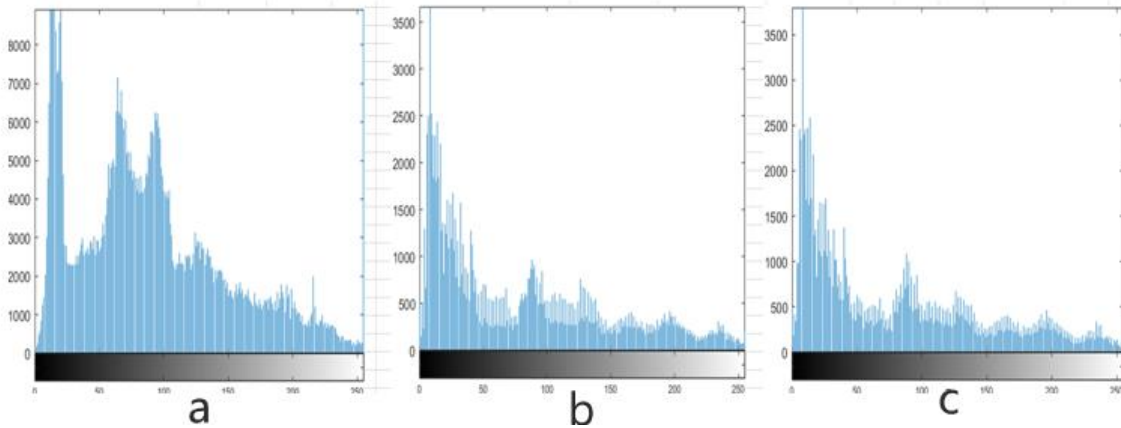
Şekil 8. (a) Veri gizlenmemiş orijinal Video2 dosyasının histogram grafiği (b) Video 2 dosyasına sıralı olarak 0,1 KB veri gizlendiğinde oluşan histogram grafiği (c) Video 2 dosyasına rastgele olarak 0,1 KB veri gizlendiğinde oluşan histogram grafiği



Şekil 9. (a) Veri gizlenmemiş orijinal Video2 dosyasının histogram grafiği (b) Video 2 dosyasına sıralı olarak 30 KB veri gizlendiğinde oluşan histogram grafiği (c) Video 2 dosyasına rastgele olarak 30 KB veri gizlendiğinde oluşan histogram grafiği



Şekil 10. (a) Veri gizlenmemiş orijinal Video2 dosyasının histogram grafiği (b) Video 2 dosyasına sıralı olarak 120 KB veri gizlendiğinde oluşan histogram grafiği (c) Video 2 dosyasına rastgele olarak 120 KB veri gizlendiğinde oluşan histogram grafiği



Şekil 11. (a) Veri gizlenmemiş orijinal Video2 dosyasının histogram grafiği (b) Video 2 dosyasına sıralı olarak 450 KB veri gizlendiğinde oluşan histogram grafiği (c) Video 2 dosyasına rastgele olarak 450 KB veri gizlendiğinde oluşan histogram grafiği

Şekil 8 de Video 2 üzerinde 0,1 KB lık veri gizleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Sıralı ve rastgele şekilde yapılan gizleme işlemi sonrasında oluşan histogram ile orijinal videodan elde edilen histogram arasında çok fark olmadığı gözlemlenmiştir. Şekil 9 da Video 2 üzerinde 30 KB lık veri gizleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Orijinal histogram ile sıralı ve rastgele şekilde yapılan gizleme işlemi sonrasında videodan elde edilen histogramlarda farkın arttığı görülmüştür. Şekil 10'da Video 2 üzerine 120 KB lık veri gizleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Şekil 11'de video 2 üzerinde 450 KB lık veri gizleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Sıralı ve rastgele şekilde yapılan gizleme işlemi sonrasında histogram değişiklikleri gösterilmiştir.

Gizleme işlemlerinde 120 KB lık ve üzeri veri gizleme yapıldıktan sonra histogram grafiklerindeki değişim daha net gözükmemektedir.

Sıralı ve rastgele gizleme sonrasında ortaya çıkan histogram grafikleri arasındaki farkın daha küçük boyuttaki veri gizleme işlemlerine göre daha fazla olduğu gözlemlenmektedir.

6. Sonuçlar ve Değerlendirme

Kişisel ya da kurumsal veri güvenliği günümüzde çok önemli bir konudur. Veri güvenliğini sağlamak için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Bu çalışmada hareketli görüntü olarak tanımlanan video dosyaları üzerinde veri gizlemek için kullanılan LSB yöntemi incelenmiştir. Bu gizleme işleminin sıralı bir şekilde ya da bir fonksiyona bağlı olarak rastgele bir şekilde yapılmasının güvenlik açısından etkisi olup olmadığı incelenmiştir. Bunun için bir uygulama geliştirilmiş, veri gizleme analiz işlemleri bu uygulama aracılığıyla yapılmıştır. Taşıyıcıdaki değişimi ölçme amacıyla PSNR ve MSE değerleri hesaplanmış, dayanıklılık için de Histogram analizi yapılmıştır. Farklı büyüklükteki dosyalara çeşitli büyüklükteki veriler sıralı ve rastgele şekilde gizlenmiştir. Elde edilen sonuçlar sayesinde

düşük miktarda saklanan verinin PSNR, MSE ve Histogram analizinde bilgi varlığının sezilmesi konusunda ayırıcı olmadığı görülmüştür. Bu yöntem ile düşük miktarda veri saklamanın oldukça güvenli olduğunu göstermektedir. Gizlenen veri miktarı arttıkça bir fonksiyona bağlı olarak rastgele şekilde yapılan gizleme yöntemindeki analiz değerlerinin yani orijinal dosya ile veri gizlenmiş dosya arasındaki fark ve benzerlik oranlarının daha iyi olduğu sonucuna varılmıştır. Bu durum da rastgele veri gizleme işleminin daha iyi olduğunu ortaya çıkartmaktadır. Sıralı gizleme işleminde gizli bilginin yerleştirilmesi işleminin ilk pikselden başlayarak sona doğru yapılması nedeniyle gizli verinin varlığının rastgele yönteme göre daha kolay anlaşılacağı sonucuna varılmıştır.

7. Kaynakça

- Akyüz, D., Kasapbaşı, M. C. (2021). Yeni kaotik video steganografi metodu. *Haliç Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 4(1), 25-40.
- Al-Othmani, A. Z., Manaf, A. A., & Zeki, A. M. (2012). A Survey On Steganography Techniques In Real Time Audio Signals And Evaluation. *International Journal of Computer Science Issues (IJCSI)*, 9(1), 30.
- Avcı, E., Tuncer, T., Ertam, F. (2014). Çok Katmanlı Görüntü Steganografi. *Uluslararası Bilgi Güvenliği ve Kriptoloji Konferansı*.
- Cox, I. J., Miller, M. L., Bloom, J. A (2000). Watermarking Applications And Their Properties. *Int. Conf. On Information Technology*, Las Vegas, USA.
- Çimen, C., Akleyek, S., Akyıldız, E. (2007). Şifrelerin Matematiği: Kriptografi, *ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık*, İstanbul.
- Doğan, A. Y. (2008). AES Algoritmasının FPGA Üzerinde Düşük Güçlü Tasarımı *Doktora Tezi*,

- İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Hacımurtazaoglu. M. (2022). Video Steganografisine Yenilikçi Bir Yaklaşım, *Doktora Tezi*, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Hu, S. D. (2011). A Novel Video Steganography Based On Non-Uniform Rectangular Partition. *In 2011 14th IEEE International Conference on Computational Science and Engineering* (pp. 57-61). IEEE.
- Misman, C. (2018). Mobil Haberleşme Güvenliğinin Steganografi İle Arttırılması, *Doktora Tezi*, Necmettin Erbakan Üniversitesi, Konya.
- Johnson N.F., Jajoida S. (1998). Exploring Steganography: Seeng the Unseen, *IEEE Computing Practices*, 0018-9162/98, 26-34.
- Nosrati, M., Karimi, R., Hariri, M. (2012). Audio steganography: A Survey On Recent Approaches. *World applied programming*, 2(3), 202-205.
- Pfitzmann B., (1996). Information Hiding Terminology, *In: Anderson, R. (eds) Information Hiding. IH 1996. Lecture Notes in Computer Science, vol 1174*. Springer, Berlin, Heidelberg. In Anderson [3], pp. 347-350, ISBN 3-540-61996-8.
- Rivest, R. L., Shamir, A., & Adleman, L. (1978). A Method For Obtaining Digital Signatures And Public-Key Cryptosystems. *Communications of the ACM*, 21(2), 120-126.
- Şahin Mesut A., Mesut A., Sakallı M.T. (2010). Görüntü Steganografide Gizlilik Paylaşım Şemalarının Kullanılması ve Güvenliğe Etkileri, *III Ağ ve Bilgi Güvenliği Sempozyumu*, Ankara.
- Şahin, A., Buluş, E., Sakallı M.T. (2006). 24-Bit Renkli Resimler Üzerinde En Önemsiz Bite Ekleme Yöntemini Kullanarak Bilgi Gizleme. *Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 7(1), 17-22.
- Şahin, A. (2007). Görüntü Steganografide Kullanılan Yeni Metodlar ve Bu Metodların Güvenilirlikleri. *Doktora Tezi*, Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne.
- Sayood K. (1996) Introduction to Data Compression, *Morgan Kauffman Publishers, Inc.* 340 Pine Street, Sixth Floor, San Francisco, CA 94104-3205, USA, 1996.

