



**Trakya Üniversitesi  
Mühendislik Bilimleri Dergisi**

**Cilt: 22      Sayı: 2      Aralık      2021**

**TRAKYA  
UNIVERSITY  
JOURNAL OF  
ENGINEERING  
SCIENCES**

**Volume: 22    Number: 2    December 2021**

**Trakya Univ J Eng Sci**

<http://dergipark.gov.tr/tujes>  
[tujes@trakya.edu.tr](mailto:tujes@trakya.edu.tr)

**ISSN 2147-0308**

# **Trakya Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi**

**Cilt: 22**

**Sayı: 2**

**Aralık**

**2021**

# **Trakya University Journal of Engineering Sciences**

**Volume: 22**

**Number: 2**

**December**

**2021**

# **Trakya Univ J Eng Sci**

<http://dergipark.gov.tr/tujes>  
[tujes@trakya.edu.tr](mailto: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 CAVİDOĞLU 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  
Doç. Dr. Aslı GÜNAY BULUTSUZ Makine Mühendisliği Yıldız Teknik 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

***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](mailto: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

#### MAKING CHUA'S DIODE WITH A SCHOTTKY DIODE-BRIDGE-FED JFET MOSFET

Schottky Köprü Diyot ile Beslenen Jfet Tipi Mosfet Kullanılarak Yapılan Chua Devresi  
Ülkühan KARAYAKA, Cansu ALAKUŞ, Reşat MUTLU, Ertuğrul KARAKULAK 41-50

#### HATAY EKOLOJİK KOŞULLARINDA YETİŞTİRİLEN MISIRDA FARKLI ÇEŞİT VE EKİM ZAMANLARININ TOHUM VERİMİ VE VERİM ÖZELLİKLERİNE ETKİLERİ

The Effects of Different Varieties and Sowing Times on Seed Yield and Yield Features in Maize Grown Under Hatay Ecological Conditions  
Merve ATASEVER, Şaban YILMAZ, İbrahim ERTEKİN 51-56

#### TOPOLOGY OPTIMIZATION OF THE LOAD-CARRYING ELEMENT UNDER A CONCENTRATED LOAD

Fatih KARAÇAM, Önder Can ARDA 57-64

#### İŞİNİM, RÜZGAR HIZI VE ÇEVRE SICAKLIĞININ PASİF SOĞUTUCULU FOTOVOLTAİK PANEL GÜÇ ÇIKIŞINA ETKİSİ

Effects Of Radiation, Wind Speed and Ambient Temperature on Passive Cooler Photovoltaic Panel Power Output  
Ahmet Erhan AKAN, Dinçer AKAL 65-72

#### DEĞİŞKEN KESİTLİ KİRİŞLERİN GENEL SINIR ŞARTLARI İÇİN TİTREŞİM ANALİZİ

Vibration Analysis of Variable Cross-Section Beam with General Boundary Conditions  
Vedat TAŞKIN, İsmail VARSERİN, Pınar Aydan DEMİRHAN 73-86

#### ALÜMİNYUM KOMPOZİT KÖPÜK MALZEMELERDE TAKVİYE ORANINA BAĞLI OLARAK DARBE DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

Investigation of Impact Behavior of Aluminum Composite Foam Materials Dependent on Reinforcement Ratio  
Metecan ÖZEN, Nilhan ÜRKMEZ TAŞKIN 87-95

#### FEM SIMULATION STUDY FOR A WELD SEAM DEFECT OF AN EXTRUDED PROFILE

Önder AYER, İsmail KARAKAYA 97-100

## MAKING CHUA'S DIODE WITH A SCHOTTKY DIODE-BRIDGE-FED JFET MOSFET

Ülkühan KARAYAKA<sup>1</sup> , Cansu ALAKUŞ<sup>1</sup> , Reşat MUTLU<sup>1</sup> , and Ertuğrul KARAKULAK<sup>2\*</sup> 

<sup>1</sup>Namık Kemal University, Çorlu Engineering Faculty, Electronics and Communication Engineering Department, Çorlu, Tekirdag, Turkey

<sup>2</sup>Electronics Department, Vocational school of Technical Sciences, Namık Kemal University, Tekirdag, Turkey

### Makale Künye Bilgisi:

Karayaka, Ü., Alakuş, C., Mutlu, R., and Karakulak, E. (2021). Making Chua's Diode With A Schottky Diode-Bridge-Fed Jfet Mosfet. *Trakya Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 22(2): 41-50.

### Highlights

- A Chua's Diode With A Schottky Diode-Bridge-Fed JFET Mosfet.
- Calculation of the PWL parameters of the Chua's diode.
- The verification of the chaotic behavior of the Chua's circuit with simulations and experiments.

Article Info	Abstract
<b>Article History:</b> Received: May 18, 2021 Accepted: December 9, 2021	The nonlinear element of a Chua circuit is called Chua's diode. It is important to make a Chua's diode with cheap and easy-to-find components. In this study, a circuit that consists of an n-type JFET fed by a Schottky diode bridge and a resistor is used to make a Chua's diode. Such components are inexpensive off-the shelves components. 1N5819 Schottky diodes and an n-type JFET BF245B are used in this study. Piecewise-linear Chua's diode parameters are calculated using the circuit elements. The Chua's circuit with the suggested Chua's diode is simulated with Simulink to see whether it shows chaotic behavior or not. After the verification of its chaotic behavior with simulations, experiments are also performed to show the circuit's chaotic behavior. The experimental results deviate from the simulation results. The reason has been diagnosed as the tolerances of the circuit parameters.
<b>Keywords:</b> Chua circuit; Chua's diode; Chaotic oscillators; Chaos; JFET	

## SCHOTTKY KÖPRÜ DİYOT İLE BESLENEN JFET TİPİ MOSFET KULLANILARAK YAPILAN CHUA DEVRESİ

Makale Bilgileri	Öz
<b>Makale Tarihiçesi:</b> Geliş: 18 Mayıs 2021 Kabul: 9 Aralık 2021	Chua devresinde kullanılan doğrusal olmayan devre elemanına Chua diyodu denir. Chua diyotunun kolay bulunabilir ve ucuz devre elemanları ile yapılması önemlidir. Bu çalışmada, bir Chua diyotu yapmak için bir Schottky diyot köprüsünden beslenen n-tipi JFET ve bir dirençten oluşan bir devre kullanılmış ve bununla bir Chua devresi yapılmıştır. Bu devre elemanları hem ucuzdur, hem de kolayca bulunabilirler. 1N5819 Schottky diyotlar ve bir n-kanallı JFET olan BF245B devrenin yapımında kullanılmıştır. Parçalı doğrusal Chua diyodunun parametreleri, devre elemanlarının parametreleri kulla nılarak hesaplanmıştır. Önerilen Chua diyotlu Chua devresinin kaotik davranış gösterip göstermediğini görmek için Simulink ile simüle edilmiştir. Kaotik davranışın simülasyonlarla doğrulanmasının ardından, devrenin kaotik davranışını göstermek için deneyler de yapılmıştır. Deneysel sonuçlar simülasyon sonuçlarından sapmaktadır. Bunun sebebinin devre parametrelerinin toleransları olduğu anlaşılmıştır.
<b>Anahtar Kelimeler:</b> chua devresi; chua'nın diyodu; kaotik osilatörler; kaos; JFET	

## 1. Introduction

Chaos has been discovered in 1963 (Lorenz 1963, Lorenz 1963). The output of deterministic chaotic systems is quite dependent on its initial conditions (Lorenz 1972). The first circuit, which shows such a chaotic behavior, is called the Chua circuit after its inventor. It is pretty famous and commonly used in chaotic studies (Matsumoto 1984, Madan 1993, Chua 1992, Haken 1975, Knobloch 1981, Hemati 1994). The Chua circuit employs a nonlinear circuit element called the Chua's diode (Chua 1999, Recai 2010, Chua 2007). The Chua's diode must be locally active (Chua 2005). There are various types of Chua's diodes in literature (Zhong 1994, O'Donoghue et.al, 2005, Muthuswamy 2010, Yener et.al 2014, Kennedy 1992, Yesil 2019, Arena et.al. 1995, Khibnik et.al 1993). Different Chua's diodes result in different chaotic dynamics (Zhong 1994, O'Donoghue et.al, 2005, Muthuswamy 2010, Yener et.al 2014, Kennedy 1992, Yesil 2019, Arena et.al. 1995, Khibnik et.al 1993, Dana et.al. 2005, Yamaçlı et.al. 2011). Some of Chua's diodes employ ordinary diodes and negative resistor circuits to obtain a piece-wise linear characteristic (Matsumoto 1984, Madan 1993, Chua 1999, Recai 2010, Chua 2007, Chua 2005, Zhong 1994, O'Donoghue et.al, 2005, Muthuswamy 2010, Yener et.al 2014, Kennedy 1992, Yesil 2019, Arena et.al. 1995, Khibnik et.al 1993, Dana et.al. 2005, Yamaçlı et.al. 2011, Chua et.al. 1983, Sedra et.al. 1998, Xu et.al. 2015). The voltage-current characteristic of a JFET Mosfet for a constant bias is well-known (Sedra 1998). In our opinion, the characteristic is pretty similar to the piecewise linear (PWL) Chua's diode characteristic (Matsumoto 1984, Chua 1992, Arena et.al. 1995) and it can be used to make a Chua's diode by combining it with a negative resistor circuit. Here, in this study, it is suggested that a JFET type Mosfet can be used to replace one of the resistors in the negative resistor circuit to make a Chua's diode and, therefore, a Chua's circuit is made with it. The suggested Chua's diode is made with off-

the shelves and cheap elements such as a JFET type Mosfet and Schottky diodes. The JFET parameters and other circuit element parameters are used to calculate the desired Chua's circuit equation parameters. The circuit behavior is examined using simulations in Simulink™ toolbox of Matlab™.

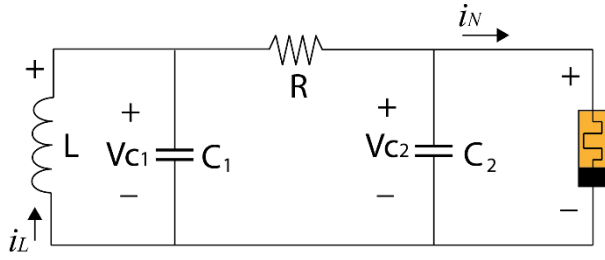
The remainder of this paper is organized as follows. The Chua's circuit, the Chua's diode, and its PWL function are briefly told in the second section. A Chua's diode based on an n type JFET, a resistor, and a Schottky diode bridge is introduced in the third section. Its simulations are given in the fourth section. Its experimental results are given in the fifth section. The conclusions are given in the final section.

## 2. The Chua Circuit, The Chua's Diode, And Its Piecewise-Linear (Pwl) Function

There are different types of Chua's diodes (Matsumoto 1984, Madan et.al. 1993, Chua 1999, Yamaçlı et.al. 2011, Chua 1983). The Chua's circuit is shown in Figure 1. It consists of two capacitors, an inductor, a resistor, and a nonlinear circuit element called Chua's diode. The state-equations for the Chua's circuit is given as follows:

$$\begin{aligned} C_1 \frac{dv_{c_1}(t)}{dt} &= G(v_{c_2}(t) - v_{c_1}(t)) - g(v_{c_1}(t)) \\ C_2 \frac{dv_{c_2}(t)}{dt} &= G(v_{c_1}(t) - v_{c_2}(t)) + i_L(t) \\ L \frac{di_L(t)}{dt} &= -v_{c_2}(t) \end{aligned} \quad (1)$$

where  $v_{c_1}(t)$ ,  $v_{c_2}(t)$ , and  $i_L(t)$  are the circuit state variables,  $t$  is time.  $C_1, C_2, L$ , and  $G = \frac{1}{R}$  are the parameters of the circuit elements.



**Figure 1.** The Chua circuit (Matsumoto 1984).

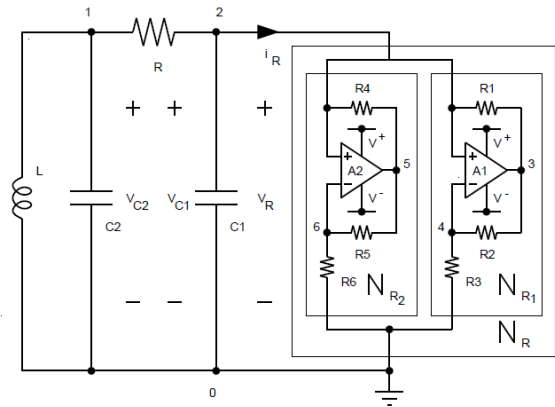
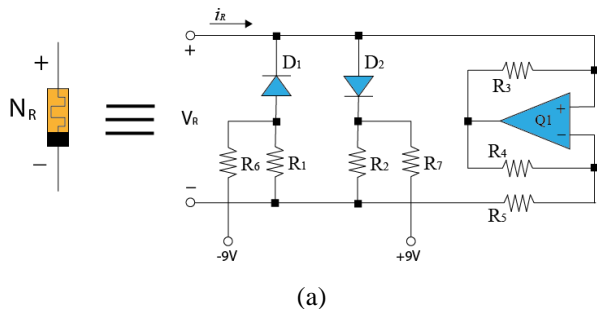
The Chua's diode is made using a negative resistor ( $N_R$ ) circuit and nonlinear circuit elements such as diodes (Matsumoto 1984, Madan 1993, Chua 1999, Recai 2010, Chua 2007, Khibnik 1993, Yamaçlı 2011, Chua 1983). Three different Chua's diode topologies are given as examples shown in Figure 2. A piecewise-linear (PWL) Chua's diode characteristic is commonly used in Chua's circuit (Matsumoto 1984, Madan 1993, Chua 1999, Recai 2010, Chua 2007, Khibnik 1993, Yamaçlı 2011, Chua 1983). and the characteristic used in (Kennedy 1992) is shown in Figure 3.  $g(v_{neg})$  is the piecewise-linear function of the Chua's diode (Kennedy 1992) and it is defined by:

$$g(v_{neg}) = m_0 v_{neg} + \frac{m_1 - m_0}{2} (|v_{neg} + B_p| - |v_{neg} - B_p|) \quad (2)$$

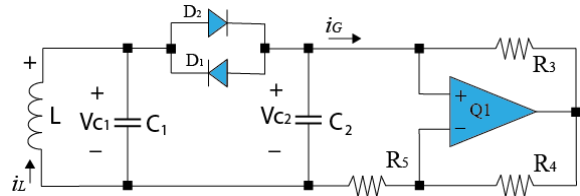
where  $V_{neg}$  is the Chua's diode voltage and  $B_p$  is the breaking point voltage,  $m_0$  and  $m_1$  are the slopes shown in Figure 3.

The Chua's diode current is given as

$$I_{neg} = g(v_{neg}) = m_0 v_{neg} + \frac{m_1 - m_0}{2} (|v_{neg} + B_p| - |v_{neg} - B_p|) \quad (3)$$

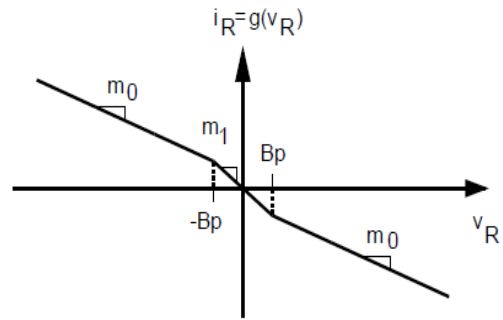


(b)



(c)

**Figure 2.** Three examples of the Chua's diodes taken from a) (Matsumoto 1984), b) (Kennedy 1992), and c) (Xu 2015).



**Figure 3.** Three-segment piecewise-linear (PWL)  $v$ - $i$  characteristic of the Chua's Circuit (Kennedy 1992).

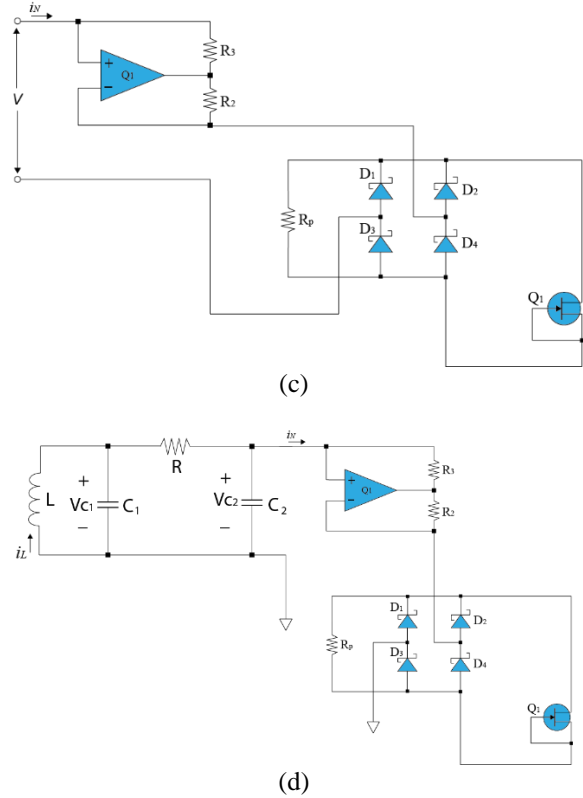
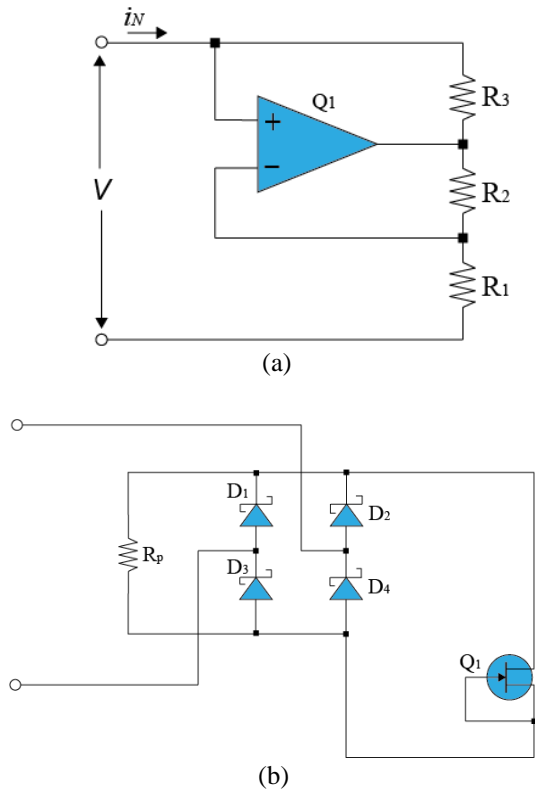
$m_0$  and  $m_1$  parameters given in Eq. (3), which are the tangents of the PWL characteristic, are shown in Figure 3. Eq. (3) can also be written as the PWL function:

$$g(V_{neg}) = \begin{cases} m_1 V_{neg} + m_1 - m_0 & ,if \quad V_{neg} \leq BP \\ m_0 V_{neg} & ,if \quad -BP \leq V_{neg} \leq BP \\ m_1 V_{neg} + m_1 - m_0 & ,if \quad -BP \leq V_{neg} \end{cases} \quad (4)$$



### 3. A Chua's Diode Made with A Schottky Diode Bridge-Fed Jfet

An opamp-based negative resistor circuit is shown in Figure 4.a. The nonlinear circuit part of the Chua's diode, which consists of a Schottky diode bridge feeding an n-type JFET connected in parallel with an LTI resistor  $R_p$ , used in this study is shown in Figure 4.b.  $R_1$  of the negative resistor is replaced with the nonlinear circuit to obtain a new type of Chua's diode as shown in Figure 4.c. Chua's circuit with this component is shown in Figure 4.d. Usage of the Schottky diodes is preferred due to their low threshold voltage, which is around 0.2-0.3 volt. The Schottky diode bridge is used to obtain the odd voltage-current characteristic shown in Figure 3, i.e. the voltage-current characteristic appears at the input of the Schottky diode bridge when excited with a low frequency signal.



**Figure 4.** a) The opamp-based negative resistor circuit, b) The nonlinear circuit to replace  $R_1$ , c) The modified negative resistor circuit or the new Chua's diode studied in this paper, d) The modified Chua's circuit with the Chua's diode studied in this paper.

### 4. Calculation of The Desired Parameters of the New Chua's Diode

The formulas necessary to calculate the desired parameters of the new Chua's diode, using  $m_0$  and  $m_1$ , are given in this section. The PWL Chua's diode characteristic and its slopes  $m_0$  and  $m_1$  are shown in Figure 3. Considering both Figure 3 and Figure 5, the circuit parameters needed to obtain chaos can be calculated as follows.

Considering the JFET current equation:

$$I_D = K \left( (V_{GS} - V_T) V_{DS} - (V_{DS})^2 / 2 \right) \quad (5)$$

The JFET saturation current is

$$I_{sat} = G_{sat} V_{sat} = G_{sat} V_{DSsat} \quad (6)$$

where  $I_{sat}$  is the saturation current,  $G_{sat}$  is the saturated conductance of the JFET for  $V_{GS} = 0$  Volt and

$$V_{DS} = V_{GS} - V_T, \text{ and } V_{DSSat} = V_{GS} - V_T.$$

The following must be true:

$$V_{DSSat} = B_p \tag{7}$$

Using the saturated conductance of the JFET and its parallel resistor value, the following tangent parameters can be obtained as

$$m_0 = -1 / R_p \tag{8}$$

and

$$m_1 = -G_{sat} - 1 / R_p, \tag{9}$$

respectively.  $R_p$  is the resistance of the resistor which is connected in parallel to the JFET to have a slope other than zero in the saturation region of the JFET.

Then, the negative resistor resistance can be found as

$$R_{neg} = -R_3 R_{AB} / R_2 \tag{10}$$

The negative resistor current is calculated as

$$I_{neg} = -R_2 V_{neg} / (R_3 R_{AB}) \tag{11}$$

where  $R_{AB}$  is the input resistance of the diode bridge shown in Figure 4.c.

If  $R_2=R_3$  is chosen, the Chua's diode current becomes equal to the negative of the diode bridge input current:

$$I_{neg} = g(v_{neg}) = m_0 v_{neg} + \frac{m_1 - m_0}{2} (|v_{neg} + B_p| - |v_{neg} - B_p|) = -V_{neg} / R_{AB} \tag{12}$$

### 5. Selection of Components of the New Chua's Diode

**Table 1.** Parameters of the Circuit Components (Kennedy 1992).

$R$	1400 Ohm
$C_1$	5.56e-9 Farad
$C_2$	50e-9 Farad
$L$	7.14e-3 Henry
$R_p$	2000 Ohm

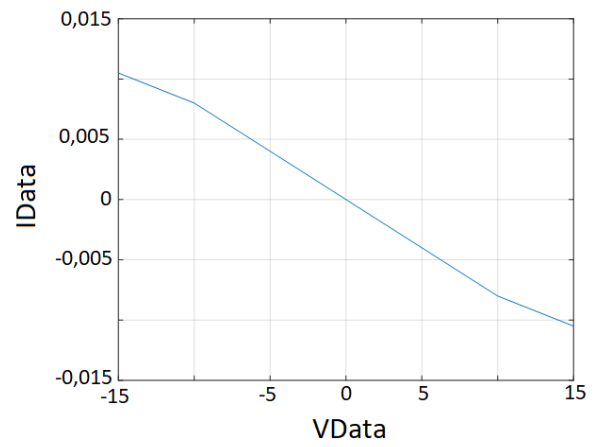
The scaling of Chua's circuit is explained in (Kennedy 1992). The Chua's circuit parameters and the PWL characteristic parameters taken from (Kennedy 1992)

given in Tables 1 and 2 respectively are used in this study.

**Table 2.** Chua's diode's scaling values (Kennedy 1992).

$m_0$	-0.5e-3 S
$m_1$	-0.8e-3 S
$B_p$	6 Volt

The PWL characteristic of the Chua diode taken from (Kennedy 1992) is shown in Figure 5.



**Figure 5.** The PWL characteristic reproduced from (Kennedy 1992).

An n-type JFET BF245B is chosen for the Chua's circuit due to its low current specification and its availability. Its characteristic is shown in Figure 6. The breaking point voltage BP is around 2.2 Volt for the characteristic shown in Figure 6. The 1N5819 Schottky diode is chosen for the full-wave rectifier bridge and its characteristic is shown in Figure 7. The equivalent characteristic of the JFET and the resistor  $R_p$  connected in parallel is shown in Figure 8. Using the 1N5819 Schottky diode bridge, the even function characteristic given in Figure 9 is obtained. However, even though, Schottky diode threshold is low, it still does exist and produces a dead zone as seen in Figure 9. 1N5819 Schottky voltage drop produces a dead zone in their equivalent characteristic since they are used together. Not to change the characteristic of the Chua

diode with the voltage applied across the gate and source nodes, We let  $V_{GS} = 0$  Volt. When  $V_{DS} \geq V_{GS} - V_T$  or the BF245B JFET is under saturation region, the n-type JFET current becomes almost constant as shown in Figure 6. It has some slope but it is not enough to obtain chaotic behavior. However, due to the PWL characteristic of the Chua's diode, a higher slope ( $m_0$ ) is needed. It can be obtained by placing a resistor ( $R_p$ ) in parallel with the n-type JFET as shown in Figure 4. The conductance of the resistor should be chosen less than the JFET's in the linear and knee region. Its value is calculated as

$$R_p = -1/m_0 = 1/0.5e-3 = 2000 \text{ Ohm} \quad (13)$$

The voltage-current characteristic seen from inputs of 1N5819 Schottky diode bridge with 0.2 Volt threshold voltage feeding the BF245B JFET for  $V_{GS} = 0$  Volt is shown in Figure 9. The current-voltage characteristic of the negative resistor circuit given in Figure 4 is shown in Figure 10. A power opamp Opa544, which is usually used as an audio amplifier, is chosen so that it could supply the currents required with the circuit components.

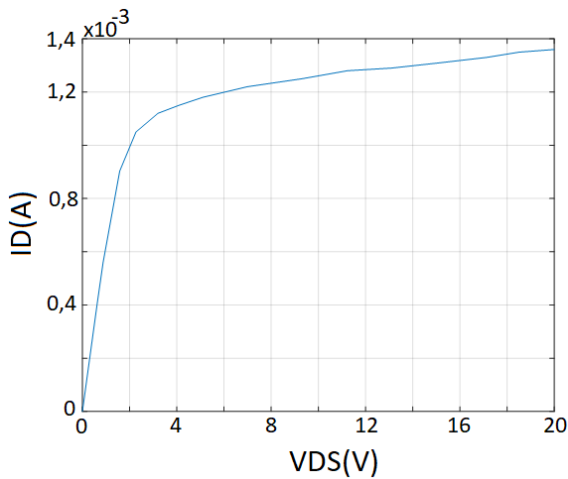


Figure 6.  $V_{DS}-I_D$  characteristic of BF245B JFET obtained experimentally.

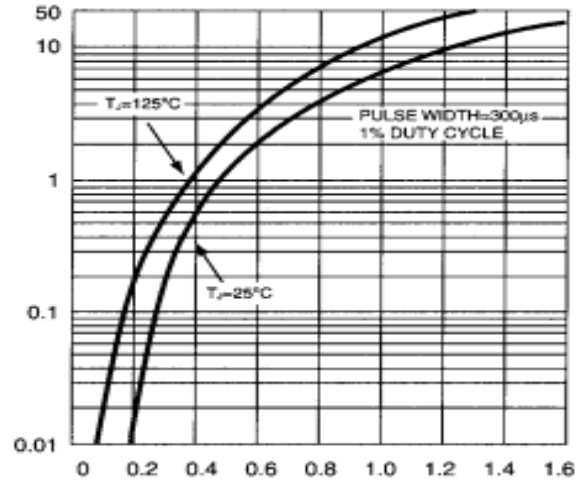


Figure 7. 1N5819 Schottky diode characteristic (Alldatasheet (15.05.2021))

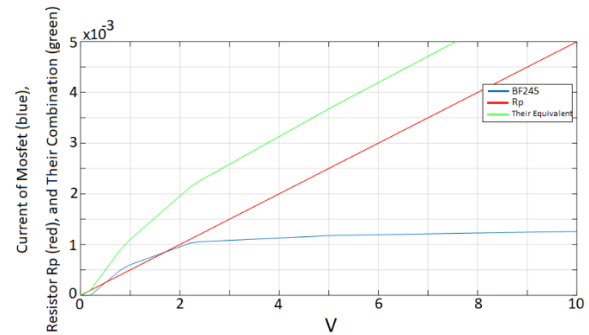


Figure 8. a) Resistor  $R_p$  characteristic shown in red, b) The BF245B JFET characteristic for  $V_{GS} = 0$  Volt shown in blue, and c) Their combined characteristic shown in green.

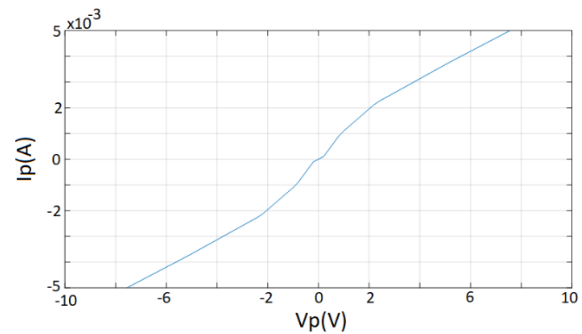
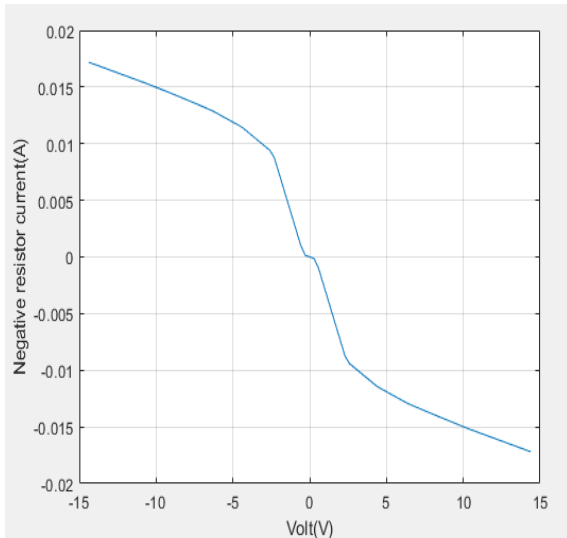


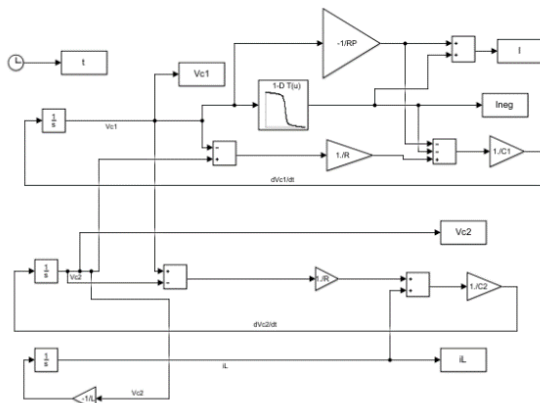
Figure 9. The voltage-current characteristic of  $R_p$  connected in parallel with 1N5819 Schottky diode bridge feeding the BF245B JFET for  $V_{GS} = 0$  Volt.



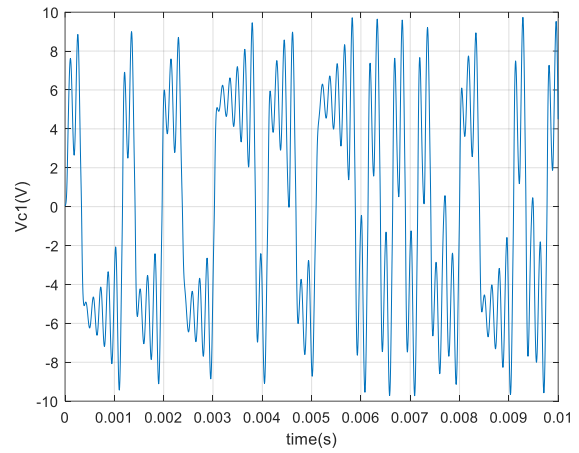
**Figure 10.** The current-voltage characteristic of the negative resistor circuit given in Figure 4.

**6. Simulations**

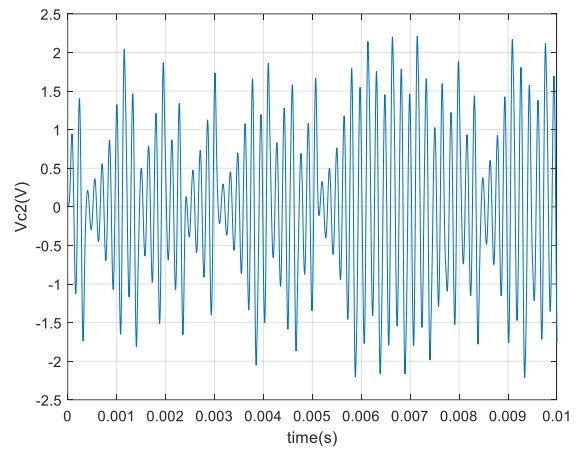
The Chua circuit is simulated in Simulink toolbox of MATLAB. Its block diagram is shown in Figure 11. Its time-domain waveforms are shown in Figure 12. Its phase portraits are given in Figure 13. The simulated waveforms in Figures 12 and 13 demonstrate chaotic behavior and strange attractors. Since the strange attractors in Figures 12 and 13 are chaotic, they exhibit sensitive dependence on initial conditions. Therefore, any two arbitrarily near alternative initial points on an attractor, after various numbers of iterations, lead to points that are arbitrarily far apart subjecting to the limits of the attractor.



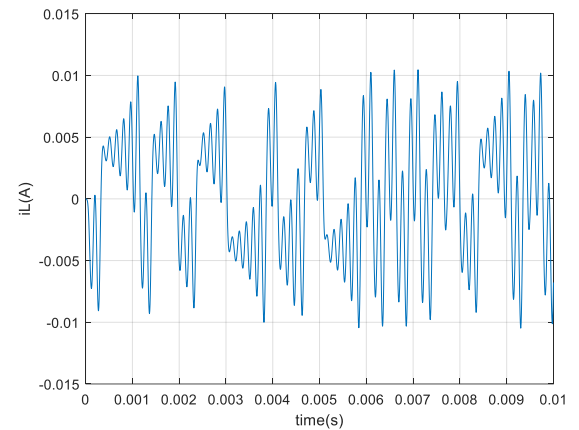
**Figure 11.** The Simulink block diagram of the system.



(a)



(b)

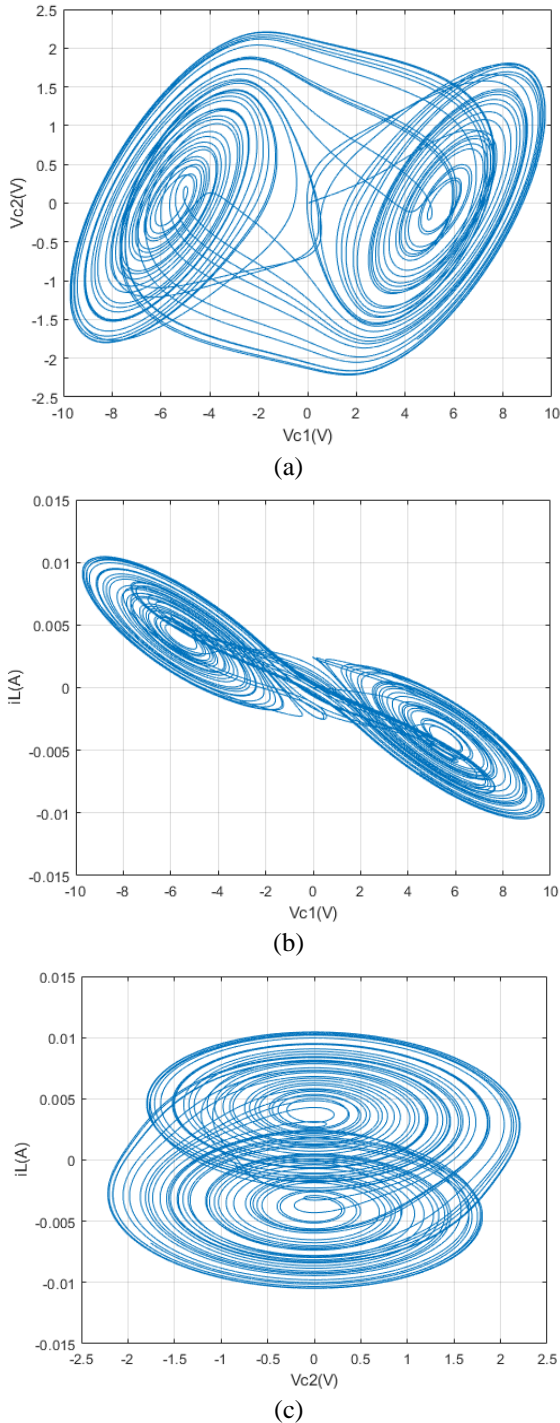


(c)

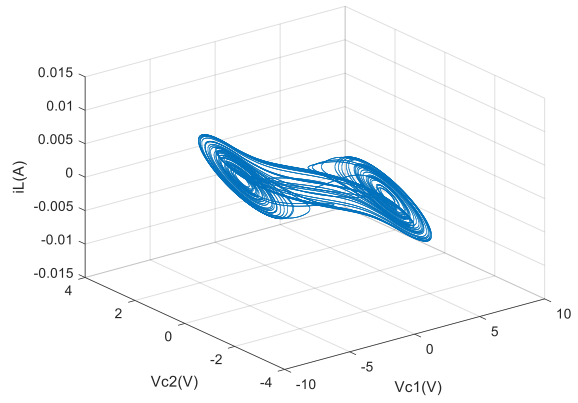
**Figure 12.** The circuit waveforms:  
**a)**  $V_{c1}$  vs.  $t$ , **b)**  $V_{c2}$  vs.  $t$ , and **c)**  $i_L$  vs.  $t$ .

Those points, after various other numbers of iterations, lead to points that are arbitrarily near together. As shown in Figures 12 and 13, the simulated circuit with the chaotic attractors is globally stable yet locally unstable. This means that once some sequences have entered any of the attractors, nearby points deviate from

one another but never go away from the attractor. The phase portrait of the circuit is also plotted in three dimensions as shown in Figure 14. The suggested Chua’s diode and the Chua circuit made with it perform well as shown with the simulations due to the existence of the strange attractors.



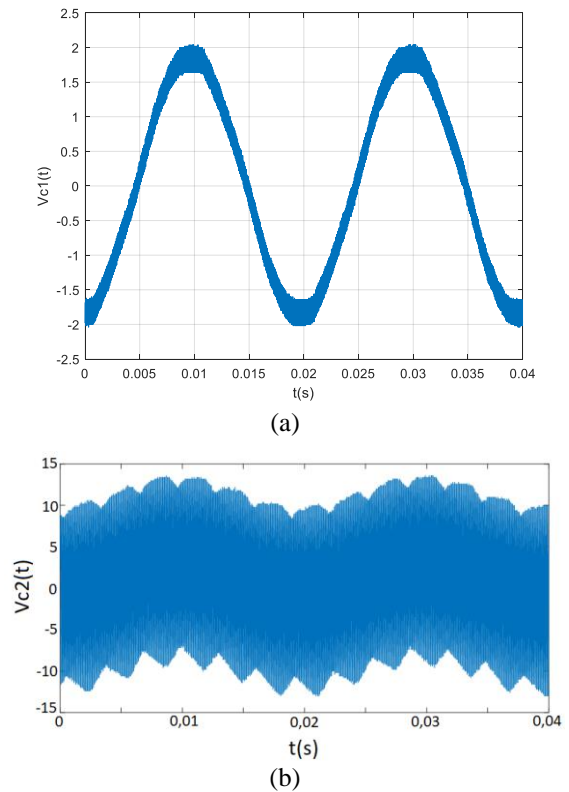
**Figure 13.** Phase portraits of the circuit: **a)**  $V_{c2}$  vs.  $V_{c1}$ , **b)**  $i_L$  vs.  $V_{c1}$ , and **c)**  $i_L$  vs.  $V_{c2}$ .

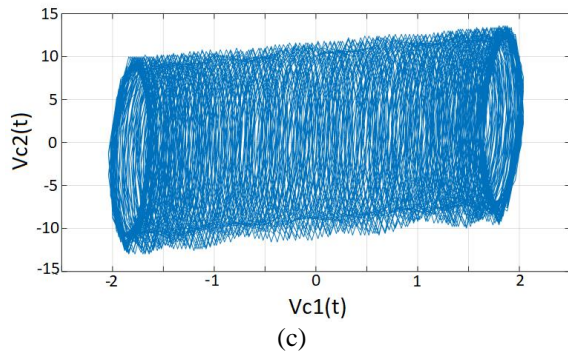


**Figure 14.** Phase portrait of the circuit drawn in three dimensions.

### 7. Experimental Results

The circuit is assembled on a board and its experimental waveforms are acquired and shown in Figures 15. The waveforms show chaotic behavior and the double scroll and strange attractors can be seen in Figure 15. However, due to JFET, Schottky diode, and resistor tolerances, the simulated and experimental waveforms do not resemble each other. The effect of the tolerances on the circuit waveforms and their behavior may be inspected in a future study.





**Figure 15.** a)  $V_{c1}$  vs.  $t$ , b)  $V_{c2}$  vs.  $t$ , c)  $V_{c2}$  vs.  $V_{c1}$

## 8. Conclusions

In literature, Chua's circuit has been made using different types of Chua's diodes. In this paper, it has been shown that a Chua diode can be made using n-type JETs and Schottky diodes. The combined characteristic of the elements is quite similar to the PWL Chua's diode characteristic. The formulas necessary to calculate the desired parameters of the new Chua's diode,  $m_o$  and  $m_l$ , are given for chaotic behavior of the circuit and circuit parameters. The circuit can be used to examine chaos in research and education purposes. The effect of the tolerances on the circuit waveforms and their behavior may be examined in a future study. As a future work, we also suggest that the circuit can also be modified to tune parameters of the Chua's diode using  $V_{GS}$  voltage of the JFET to obtain different chaotic behavior.

## Declaration Of Ethical Standards

The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

## References

Alldatasheets,

<https://www.alldatasheet.com/datasheetpdf/pdf/983997/PACELEADER/1N5819.html>, Retrieved 15.05.2021.

- Arena, P., Baglio, S., Fortuna, L., Manganaro, G. (1995). Chua's circuit can be generated by CNN cells. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*, 42(2), 123-125.
- Chua, L. O., (1992), "The genesis of Chua's circuit," *Int. J. Electron., Communicat.*, vol. 46, no. 4, 1992.
- Chua, L. O. (1999). Passivity and complexity. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*, 46(1), 71-82.
- Chua, L. O. (2007). Chua circuit. *Scholarpedia*, 2(10), 1488.
- Chua, L. O. (2005) Local Activity is the Origin of Complexity, *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 15: 3435-3456.
- Chua, L. O., Yu, J., Yu, Y. (1983). Negative resistance devices. *International Journal of Circuit Theory and Applications*, 11(2), 161-186.
- Dana, S.K., Chakraborty, S., Ananthakrishna, G. (2005). Homoclinic bifurcation in Chua's circuit. *Pramana*, 64(3), 443-454.
- Haken H., (1975), "Analogy between higher instabilities in fluids and lasers," *Phys. Lett. A*, vol. 53, no. 1, pp. 77-78.
- Hemati, N., (1994), "Strange attractors in brushless DC motors," *IEEE Trans. Circuits Syst. I Fundam. Theory Appl.*, vol. 41, no. 1, pp. 40-45,
- Kennedy, M. P. (1992). Robust OP Amp realization of chua's circuit. *Frequenz.*, 46(3), 66-80.
- Khibnik, A. I., Roose, D., Chua, L. O. (1993). On periodic orbits and homoclinic bifurcations in Chua's circuit with a smooth

- nonlinearity. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 3(02), 363-384.
- Knobloch, E. (1981), "CHAOS IN THE SEGMENTED DISC DYNAMO," *Phys. Lett.*, vol. 82A, no. 9, pp. 439-440.
- Lorenz, E. (1963). Chaos in meteorological forecast. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 20(2), 130-141.
- Lorenz, E. N. (1963). Deterministic nonperiodic flow. *Journal of the atmospheric sciences*, 20(2), 130-141.
- Lorenz, E. (1972). Predictability: does the flap of a butterfly's wing in Brazil set off a tornado in Texas? (p. 181). na.
- Madan, Rabinder N. (1993). *Chua's circuit: a paradigm for chaos*. River Edge, N.J.: World Scientific Publishing Company. [Bibcode:1993ccpc.book.....M](#). [ISBN 9 81-02-1366-2](#).
- Matsumoto, T. (1984). A chaotic attractor from Chua's circuit. *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, 31(12), 1055-1058.
- Muthuswamy B., (2010), "[Implementing memristor based chaotic circuits](#)", *International Journal of Bifurcation and Chaos*, Vol. 20, No. 5 1335-1350, World Scientific Publishing Company, [doi:10.1142/S0218127410026514](#).
- O'Donoghue, K., Kennedy, M. P., & Forbes, P. (2005). "A fast and simple implementation of Chua's oscillator using a" cubic-like" Chua diode. In *Proceedings of the 2005 European Conference on Circuit Theory and Design*, 2005. (Vol. 2, pp. II-83). IEEE.
- Recai, K. (2010). *A practical guide for studying Chua's circuits* (Vol. 71). World Scientific.
- Sedra, A. S., Sedra, D. E. A. S., Smith, K. C., & Smith, K. C. (1998). *Microelectronic circuits*. New York: Oxford University Press.
- Xu, Q., & Bao, B. C. (2015). Simplified Chua's attractor via bridging a diode pair. *The Journal of Engineering*, 2015(4), 125-127.
- Yamaçlı, V., Abacı, K., & Köse, E. (2011) "Chua Devresinin Gerçeklenmesi ve Simülasyonu". In *6th International Advanced Technologies Symposium, Elazığ-Türkiye* (pp. 82-86).
- Yener Ş.Ç., Kuntman, H. H., (2014), "Fully CMOS memristor based chaotic circuit," *Radioengineering*, vol. 23, no. 4.
- Yesil A., Babacan Y., (2019), "Implementation of Electronically Controllable Memristor Based Chua Circuit," *J. Inst. Sci. Technol.*, vol. 9, no. 1, pp. 121-129.
- Zhong, G. Q. (1994). Implementation of Chua's circuit with a cubic nonlinearity", *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*, 41(12), 934-941.

# HATAY EKOLOJİK KOŞULLARINDA YETİŞTİRİLEN MISIRDA FARKLI ÇEŞİT VE EKİM ZAMANLARININ TOHUM VERİMİ VE VERİM ÖZELLİKLERİNE ETKİLERİ

Merve ATASEVER<sup>1</sup> , Şaban YILMAZ<sup>2</sup> , İbrahim ERTEKİN<sup>2\*</sup> 

<sup>1</sup>Hatay Büyükşehir Belediyesi, Çevre Koruma ve Kontrol Daire Başkanlığı, Atık Yönetimi Şube Müdürlüğü, Antakya, Hatay

<sup>2</sup>Hatay Mustafa Kemal Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarla Bitkileri Bölümü, Antakya, Hatay

## Makale Künye Bilgisi:

Atasever, M., Yılmaz, Ş., Ertekin, İ. (2021). Hatay Ekolojik Koşullarında Yetiştirilen Mısırdaki Farklı Çeşit ve Ekim Zamanlarının Tohum Verimi ve Verim Özelliklerine Etkileri, *Trakya Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 22(2), 51-56.

## Öne Çıkanlar

- Amik ovası koşullarında ana ürün mısır yetiştiriciliği kapsamında erken ekim ile birlikte suluma masraflarının azaltılabileceği belirlenmiştir.
- Erken ekimde en uygun mısır çeşidinin DKC 6590 olduğu saptanmıştır.
- Ana ürün mısırdaki 25 Şubat ve 14 Mart tarihli ekimin 30 Mart tarihli ekimden daha iyi sonuç verdiği tespit edilmiştir.

Makale Bilgileri	Öz
<b>Makale Tarihiçesi:</b> Geliş: 5 Eylül 2021 Kabul: 9 Aralık 2021	İklim değişikliği ile bölgelerin ekolojik şartları yıllardır değişime uğramaktadır. Bölge ekolojisinin değişimi ile bölgelerdeki bitki türleri ve çeşitlerinin ekim zamanları yeniden bilimsel çalışmalara konu olmaya başlamıştır. Bu çalışma Hatay ekolojik şartlarında ana ürün olarak mısır tarımında en uygun ekim zamanını belirlemek için yürütülmüştür. P31P41, 70 May 82, DKC 6590 ve Carella F1 mısır çeşitleri çalışmada bitki materyali olarak kullanılmıştır. Bitki materyali olarak seçilen ve bölgede yaygın bir şekilde tarımı yapılan bu çeşitlere farklı ekim zamanları (25 Şubat, 14 Mart ve 30 Mart) uygulanmıştır. Deneme tesadüf bloklarında bölünmüş parseller deneme desenine göre 3 tekrarlamalı olarak kurulmuştur. Mısır çeşitlerinde koçan uzunluğu, koçan çapı, koçanda sıra sayısı, koçan sırasındaki tane sayısı, bin dane ağırlığı ve tohum verimi özellikleri incelenmiştir. Varyans analiz sonuçlarına göre, koçan uzunluğu ve çapı dışında incelenen tüm özellikler üzerine ekim zamanlarının etkisi önemli bulunmuştur. Bu sonuçlara göre, Hatay ekolojik koşullarında mısır için en uygun ekim zamanı 25 Şubat ve 14 Mart olarak belirlenmiştir.
<b>Anahtar Kelimeler:</b> Dane mısır; Tohum verimi; Hatay; Ekim zamanı	

## THE EFFECTS OF DIFFERENT VARIETIES AND SOWING TIMES ON SEED YIELD AND YIELD FEATURES IN MAIZE GROWN UNDER HATAY ECOLOGICAL CONDITIONS

Article Info	Abstract
<b>Article History:</b> Received: September 5, 2021 Accepted: December 9, 2021	With the global climate change, the ecological conditions of the regions have changed over the time. With the change in ecology, the sowing times of the plant species and cultivars cultivated in the region have started to be the subject of research again. This study was conducted to determine the sowing time in the cultivation of grain corn as the main crop in Hatay ecological conditions. P31P41, 70 May 82, DKC 6590 and Carella F1 maize cultivars were used as plant material in the study. Three different sowing times (25 February, 14 March and 30 March) were applied to these varieties, which were selected as plant material and widely cultivated in the region. The experiment was laid out according to the split plot in randomized complete block design with three replications. Ear length, ear diameter, number of rows per ear, number of grains per row of ear, thousand grain weight and seed yield characteristics were investigated in maize cultivars. According to the results of analysis of variance, the effect of sowing times was significant on all traits expect for ear length and ear diameter. According to these results, it was determined that the most suitable sowing time for maize in Hatay ecological conditions was February 25 and March 14.
<b>Keywords:</b> Grain maize; Grain yield; Hatay; Sowing time	



## 1. Giriş

Mısır C4 bitkisi olması nedeniyle güneş enerjisini en iyi şekilde kullanan ve birim alandan en fazla kuru madde üreten tahıldır. Ülkemizde tahıllar grubu içerisinde buğday ve arpadan sonra en geniş ekim alanına ve üretime sahiptir. Mısır onlarca kullanım amacı olan ve pek çok endüstri kolunun hammaddesi olan popüler bir kültür bitkisidir. Mısır bitkisi içerdiği zengin besin maddeleri nedeniyle yem hammaddesi olarak hayvan beslenmesinde kullanılmaktadır. Mısır yukarıda sıralanan çok yönlü kullanım alanı, geniş adaptasyon yeteneği ve yüksek verim potansiyeli sebebiyle dünyanın değişik enlem ve boylamları ile yükseltilerindeki değişik ülkelerde tarımı yapılabilen bir türdür. Bu durum birim alan verimi en yüksek tahıl cinsi olmasından kaynaklanmaktadır (Anonim, 2016).

Mısırın artan önemi her yıl yeni çeşitlerin tescillenerek piyasaya sunulmasını sağlamaktadır. Bunların bölgeye uygunluğunun belirlenmesi büyük önem taşımaktadır. Mısırdaki erken oluma gelen çeşitler olduğu gibi, uzun vejetasyon periyoduna sahip geç olumlu çeşitler de bulunmaktadır. Özellikle iklim koşulları sebebiyle bir yılda birden çok ürün alınabilen yerlerde üreticinin bu konuya çok dikkat etmesi gerekmektedir (Koca ve Ereku, 2011). Çukurova ve Amik ovasında yürütülen bir araştırmada en yüksek hasıl veriminin erken ekimlerden elde edildiği, ekim zamanı geciktikçe hasıl veriminin azaldığı ve verimin çeşitlerden etkilendiği saptanmıştır (Konak ve Demir, 1987, Sağlamtimur, 1989, Laurer ve ark., 1999, Yılmaz ve ark., 1999, Yılmaz ve ark., 2007).

Birim alandan yüksek verim alabilmek için yetiştirilen mısır bitkisinde bölgenin iklim ve toprak koşullarına uyum sağlayan bir çeşidin ekilmesi ve o çeşidin o bölge koşullarında en iyi gelişme devrelerine sahip olabileceği dönemde ekilmesi gerekmektedir. Ekilen bir çeşidin verim potansiyelini ortaya koymada ekim zamanı en önemli faktörlerden biridir. Birim alandaki verimi arttırmak son yıllarda erken ekim uygulamaları

yaygınlaşmaya başlamıştır. Mısır bitkisi vejetatif periyodunu daha soğuk ve rutubetli dönemde geçireceğinden bitki iyi gelişir, verim artar; tepe ve koçan püskülü çıkışı yaz aylarındaki kuraklık stresinden ve rutubet noksanlığından önce meydana gelir ve dölleme bozukluğu gibi bir risk ortadan kalkar; erken olgunlaşma nedeniyle çiftçiler için belirgin fiyat avantajları ortaya çıkar. Ancak, erken ekimde soğuk ve rutubetli toprakta çimlenmede gecikmeler olabilmektedir. Bu durum toprak altı zararlıları tarafından tohumların zarar görmesine yol açmakta ve bitki sıklığının azalmasına neden olmaktadır. Diğer taraftan erken ekimde don zararı ve yabancı ot sorunu ortaya çıkabilmektedir (Kırtok, 1998). Mısırın en uygun ekim zamanı, toprağın 7 cm'lik katmanında sıcaklığın 15°C'ye ulaştığı dönemdir. Toprak sıcaklığı uygun olduğu halde, topraktaki nem araziye girilmesini ve istenilen zamanda ekimin yapılmasına olanak vermeyebilmektedir.

Son yıllarda küresel iklim değişikliğinin etkisiyle bitkisel üretim yapılan alanlarda iklim değişiklikleri meydana gelmektedir ve ekim işlemlerinde iklim değişikliğine bağlı olarak çeşitli problemler ortaya çıkmaktadır. Özellikle yoğun bir şekilde kültürü yapılan bitkilerde iklim değişikliğinden dolayı ekim zamanlarının yeniden araştırılması büyük önem arz etmektedir. Ele alınan bu çalışma ile Amik Ovası koşullarında ana ürün yetiştirme döneminde, 4 ticari melez mısır çeşidinde, farklı erken ekim zamanlarının verim ve verime ait diğer özellikler üzerine etkisini saptamak amaçlanmıştır.

## 2. Gereç ve Yöntem

Bu araştırma mısır bitkisinin farklı ekim zamanlarına göre tohum verimi ve verim unsurlarını belirlemek için 2017 yılında tesadüf blokları deneme deseninde bölünmüş parsellere göre 3 tekerrürlü olarak yürütülmüştür. 3 ekim zamanı (25 Şubat, 14 Mart, 30 Mart) ana parselleri, 4 mısır çeşidi ise (P31P41, 70

MAY 82, DKC 6590, CARELLA F1) alt parselleri oluşturulmuştur. Parsel büyüklüğü (4.9 m × 5m) 24.5 m<sup>2</sup> olarak planlanmıştır. 5 metre uzunluğundaki her parsel toplam 7 sıradan oluşmuştur. Deneme parsellerine sıra arası mesafeler 70 cm, sıra üzeri mesafe 15 cm ve ekim derinliği 3-5 cm olacak şekilde elle ekim yapılmıştır. Bloklar arasında 3 m mesafe bırakılmıştır.

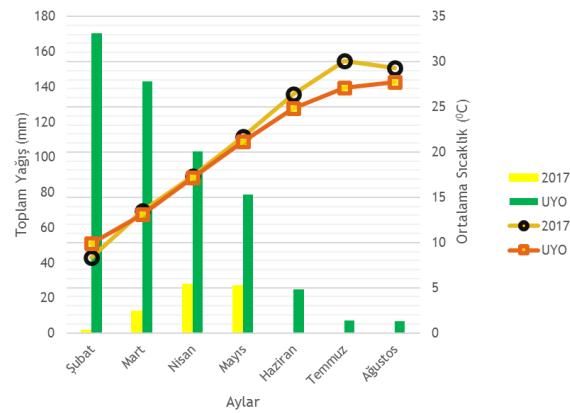
Araştırma sahasının toprak özellikleri killi-tınlı yapıda, toplam tuz içeriği önemsiz, pH'sı alkali durumda, kireç oranı çok yüksek, fosfor içeriği çok düşük ve organik madde içeriği ise düşük şeklindedir. Araştırma bir önceki yıl soğan ekili arazi üzerine kurulmuştur. Soğan ekimi yapılmış tarla soğan toplandıktan sonra pullukla sürülmüştür. Ekim öncesi holder ile dekara 1 kg sıvı halde humik asit atılmıştır. Çalışmanın yapıldığı ekim deseninde dekara 1 kg humik asit atıldıktan sonra toprağı havalandırmak amacıyla toprak kültivatör ile sürülmüştür. 2 gün beklendikten sonra gübre serpme makinası ile dekara 40 kg içeriği %15 azot (N), %15 fosfor (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>), % 15 potasyum (K<sub>2</sub>O) olan taban gübresi atılmıştır. Toprağı havalandırmak ve gübreyi toprağa karıştırmak amacıyla goble ile tarla tekrar sürülmüştür. Toprak 2 gün beklendikten sonra 1. tapan ertesi gün de 2. tapan çekilerek arazi ekime hazır hale getirilmiştir.

Ekimde kolaylık sağlaması amacıyla boş tohum mibzeri ile hatlar çekildikten sonra her ekim noktasına iki tohum gelecek şekilde elle ekim yapılmıştır. Birinci ve ikinci ekimler yağmurlama sulama ile üçüncü ekim tankerle sulanarak mısırların nizami çıkması sağlanmıştır. Çalışma sahasımızda traktör ve çapa aleti ile 30 Mart tarihinde 25 Şubat tarihli ekim için birinci çapa çekilmiştir. Çapa çekilirken sulama kanallarının geçtiği yerler belirlenerek köten (pulluk) ile sürülmüştür. 10 gün sonra (09.04.2017) 25 Şubat tarihli ekim için ikinci çapa ve 14 Mart tarihli ekim için birinci çapa, bu çapadan 10 gün sonrada 25 Şubat tarihli ekim için üçüncü, 14 Mart için ikinci ve 30 Mart tarihli ekim için birinci çapa (19.04.2017) çekilmiştir. 12 Nisan

2017 tarihinde tarlaya yağmur öncesi gübre serpme makinası ile dekara 10 kg üre atılmıştır. Çalışmanın yürütüldüğü ekim deseninde 18 Nisan 2017 tarihinde öncelikle yabancı otlar ile mücadele kapsamında otlar elle ve bıçak ile temizlenmiştir. Otlar temizlendikten sonra yeni çıkacak otları ve gözden kaçan otları öldürmek amacıyla holder ile herbisit olarak içeriği 225 g L<sup>-1</sup> isoxaflutole, 90 g L<sup>-1</sup> thiencazobazone-methyl 150 g L<sup>-1</sup> cyprosulfamide olan yabancı ot ilacı atılmıştır. İlk sulamadan önce araziye holder ile dekara 100 g humik asit ile birlikte sap kurdu ilacı atılmıştır. 4 Mayıs 2017 tarihinde sulama kanallarına sifon adı verilen su boruları yerleştirilmiştir. Çalışma alanımız sifonların dizilmesi ile sulamaya hazır hale getirilerek 5 Mayıs 2017 tarihinde ilk sulama yapılmıştır.

Yetiştiricilik periyodu içerisinde en fazla yağış Nisan ayında düşmüştür. Genel olarak tüm aylarda ortalama sıcaklık uzun yıllar ortalamasından (UYO) daha yüksek tespit edilmiştir. Deneme yerinin yetiştiricilik periyodu boyunca UYO göre daha sıcak olduğu belirlenmiştir. Ayrıca Haziran, Temmuz ve Ağustos aylarında yağış olmamıştır (Şekil 1).

Farklı ekim zamanları uygulanan mısır çeşitlerinde 25 Şubat tarihli ekim için 7 sulama, 14 Mart tarihli ekim için 8 sulama ve 30 Mart tarihli ekim için 9 sulama yapılmıştır.



Şekil 1. Denemenin yürütüldüğü alana ve periyoda ait iklim özellikleri

Her bir parselden hasat edilen koçanlar harman edildikten sonra 4'lü 100'er adet tohum ayrılmış ve tartılmıştır. Tartılan tohum ağırlıklarından bin dane ağırlığı hesaplanmıştır. Kenar tesirleri çıkarılan parsellerden tüm koçanlar hasat edilmiş ve harmanlanmıştır. Elde edilen tohumlar %14 neme kadar açık havada kurutulmuş ve tartılmıştır. Tohum verimleri kg da<sup>-1</sup> biriminde sunulmuştur.

Bu çalışmadan elde edilen tüm sayısal verilerde Tesadüf Bloklarında Bölünmüş Parseller Deneme Desenine göre varyans analizi yapılmış, önemli bulunan özelliklerde % 5'e göre Duncan çoklu karşılaştırma testi uygulanmıştır.

### 3. Bulgular ve Tartışma

Koçan boyu ve koçan çapı bakımından ekim zamanlarının etkisi önemsiz bulunmuştur (Tablo 1). Ekim zamanlarına göre koçan boyu değerleri 17.01-18.22 cm arasında, koçan çapı değerleri 45.69-47.01 mm arasında değişiklik göstermiştir. Hem koçan boyunda hem de koçan çapında en yüksek değerler 14 Mart tarihli ekimde belirlenmiştir. Koçan boyu bakımından elde edilen bulgular Gözübenli ve ark. (1997) ve Han (2016)'nın rapor ettiği değerlerden düşük, Çölkesen ve ark. (1997)'nin değerlerinden yüksek bulunmuştur. Elde edilen koçan boyu değerleri Gözübenli ve ark. (1997)'nin bulguları ile benzerlik göstermektedir. Literatüre göre ortaya çıkan farklılıkların temel sebebi çeşitler ile ekolojik koşulların farklılığı olarak düşünülmektedir. Koçan çapı ile ilgili olarak araştırmadan elde ettiğimiz sonuçlar Demirci (2009)'nin sonuçlarından yüksek, Demiray (2013)'in sonuçlarından düşük bulunmuştur.

Farklı ekim zamanlarında koçanda sıra sayısı değerleri 13.83 ve 14.67 adet olarak tespit edilmiştir. 14 Mart tarihli ekim ile 30 Mart tarihli ekim benzer sonuç vermiştir. Koçanda sıra sayısı değerleri Bengisu (1994)'nin değerleri ile benzerlik gösterirken Han (2016)'in değerlerinden yüksek bulunmuştur. Sırada dane sayısı değerleri 36.75 ile 39.58 arasında değişmiş

ve en yüksek değer 14 Mart tarihli ekimden elde edilmiştir. Ayrıca 25 Şubat tarihli ekimde istatistiksel olarak aynı grupta yer almıştır. Bu çalışmadan elde edilen sırada dane sayısı değerleri Han (2016)'ın değerlerinden daha yüksek bulunmuştur. Bin dane ağırlığı 340.60g ile 375.80 g arasında değişirken tohum verimi 1177.00 kg da<sup>-1</sup> ile 1390.00 kg da<sup>-1</sup> arasında değişiklik göstermiştir. Bin dane ağırlığı en yüksek 25 Şubat tarihli ekimde tespit edilmiş, ayrıca 14 Mart tarihli ekimde istatistik olarak aynı grupta yer almıştır. En yüksek tohum verimi 14 Mart tarihli ekimden elde edilmiş aynı zamanda 25 Şubat tarihli ekimde aynı grupta yer almıştır. Bin dane ağırlığı ile ilgili sonuçlar genel olarak literatür bildirişlerinden daha yüksek bulunmuştur (Çölkesen ve ark., 1997; Özemen, 2008; Han, 2016). Tohum verimi ile ilgili sonuçlar birçok literatür bildirişi ile benzerlik göstermektedir.

Çeşitlerin incelenen tüm özellikler üzerine etkisi önemli bulunmuştur (Tablo 1). Koçan boyu değerleri 16.21 ile 19.29 cm arasında değişiklik göstermiştir. En yüksek koçan boyu 70 May 82 çeşidinden elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar Gözübenli ve ark. (1997)'nin bildirdiği sonuçlar ile benzerlik göstermektedir. Koçan çapı değerleri 45.03 ile 49.00 mm arasında değişmiş en yüksek koçan çapı Carella F1 çeşidinde tespit edilmiştir. Elde edilen koçan çapı sonuçları bazı literatür bildirişleri ile benzerlik göstermiştir (Özmen, 2008; Han, 2016). Koçanda sıra sayısı değerleri 13.00 ile 16.44 adet arasında tespit edilmiştir. En yüksek koçanda sıra sayısı Carella F1 çeşidinde belirlenmiştir. Yapılan bir çalışmada, Çeşitler arasında koçanda sıra sayısının değişiklik gösterdiği bildirilmiştir (Bengisu, 1994; Han, 2016). Sırada dane sayısı değerleri 34.89 ile 40.11 adet arasında belirlenmiş ve en yüksek sonuç DKC 6590 çeşidinden elde edilmiştir. Sırada dane sayısı değerleri Han (2016)'ın sonuçlarından daha yüksek bulunmuştur. Bin dane ağırlığı değerleri 327.80 ile 395.10 g arasında, tohum verimleri ise 1248.00 ile 1390.00 kg da<sup>-1</sup> arasında değişiklik göstermiştir. Bin

dane ağırlığı en yüksek 70 May 82 çeşidinden elde edilirken, tohum verimi ise en yüksek DKC 6590 çeşidinden elde edilmiştir. Muhtemelen çeşitlerin özelliklerinden ve ekolojik koşulların farklılığından

dolayı çalışmadan kullanılan çeşitlerin bin dane ağırlığı ve tohum verimleri literatür bildirişlerinden biraz yüksek bulunmuştur (Çölkesen ve ark., 1997; Özemen, 2008; Han, 2016).

**Tablo 1.** Ekim zamanları ve çeşitlerin incelenen özellikler üzerine etkisi, ortalama değerler ve önemli bulunan özelliklere ait ortalama karşılaştırma testi sonucunda oluşan gruplar

Ekim Zamanları	Koçan boyu (cm)	Kaçan çapı (mm)	Koçanda sıra sayısı (adet)	Sırada dane sayısı (adet)	Bin dane ağırlığı (g)	Tohum verimi (kg da <sup>-1</sup> )
25 Şubat	17.01	46.64	13.83 B	38.75 AB	375.80 A	1385.00 A
14 Mart	18.22	47.01	14.67 A	39.58 A	366.60 A	1390.00 A
30 Mart	17.36	45.69	14.67 A	36.75 B	340.60 B	1177.00 B
<i>p</i> değeri	öd	öd	*	*	*	**
<b>Çeşitler</b>						
Carella F1	16.21 C	49.00 A	16.44 A	34.89 B	331.70 B	1248.00 B
DKC 6590	17.55 B	45.03 B	15.00 B	40.11 A	327.80 B	1390.00 A
70 May 82	19.29 A	45.60 B	13.11 C	39.44 A	395.10 A	1278.00 B
P31P41	17.09 BC	46.16 B	13.00 C	39.00 A	389.30 A	1354.00 AB
<i>p</i> değeri	**	**	**	**	**	*
İnteraksiyon <i>p</i> değeri	öd	öd	öd	öd	öd	öd

Aynı sütunda farklı harflerle gösterilen veriler istatistiksel olarak birbirinden farklıdır. öd: önemli değil, \*: %5’de önemli, \*\*: %1’de önemli

Ekim zamanları ve çeşitler interaksiyonunun incelenen tüm özellikler üzerine etkisi istatistiksel olarak önemsiz bulunmuştur (Tablo 1). Bu yüzden interaksiyon verilerinin paylaşılması lüzumlu görülmemiştir.

### Sonuçlar ve Değerlendirme

Bu çalışmanın sonuçlarına göre Amik ovası koşullarında en uygun ekim zamanının 25 Şubat ve 14 Mart tarihi olduğu belirlenmiştir. Bu bölge için bu tarihte en uygun çeşidin DKC 6590 olduğu saptanmıştır. 14 Mart tarihli ekimle birlikte 30 Mart tarihine kıyasla 1 sulama daha az yapıldığı tespit edilmiştir.

### Çıkar çatışması

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

### Teşekkür

Bu çalışma MKÜ Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu tarafından Merve ATASEVER’in yüksek lisans tezi projesi olarak 16689 proje numarası ile desteklenmiştir.

### Açıklama

Bu çalışma “III. BALKAN AGRICULTURAL CONGRESS”de sözlü bildiri olarak sunulmuştur.

### Kaynaklar

Aktürk, H. (2005). Hatay Koşullarında Ana Ürün Olarak Yetiştirilen Bazı Mısır Çeşitlerinde Ekim Zamanı ve Bitki Sıklığının Verim ve Verimle İlişkili Özelliklere Etkisi. Mustafa Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tarla Bitkileri Anabilim Dalı, S: 60, Hatay.

- Anonim. (2016). <http://www.agrotimeyayincilik.com.tr/2016/05/10/turkiyede-misir-uretimi-rekora-ulasti>.
- Bengisu, A.G. (1994). Harran Ovası Sulu Koşullarında İkinci Ürün Olarak Yetiştirilen Mısırdaki Verim ve Tarımsal Karakterler Arasındaki İlişkilerin Saptanması Üzerine Bir Araştırma, Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tarla Bitkileri Ana Bilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, Şanlıurfa.
- Cesurer, L. & Ünlü, G. (2001). Farklı lokasyonlarda yürütülen ikinci ürün hibrit mısır çeşitlerinin bazı bitkisel ve tarımsal özelliklerinin incelenmesi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen ve Mühendislik Dergisi, 4(1), 138-149.
- Çölkesen, M., Öktem, A., Akıncı, C., Gül, İ. & İri, R. (1997). Şanlıurfa ve Diyarbakır Koşullarında Bazı Mısır Çeşitlerinde Farklı Ekim Zamanlarının Verim ve Verim Komponentleri Üzerine Etkisi. Türkiye II Tarla Bitkileri Kongresi, 22-25 Eylül 139-142, Samsun.
- Demiray, Y.G. (2013). Bingöl İli Ekolojik Şartlarına Uygun Tane Mısır Çeşitlerinin Belirlenmesi. Bingöl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Bingöl.
- Demirci, G. (2009). Hibrit Mısır Çeşitlerinde Verim, Verim Öğeleri, Tane Nem Kaybetme Hızı ile Aralarındaki İlişkilerin Belirlenmesi. Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tarla Bitkileri Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, Konya.
- Gözübenli, H., Ülger A.C., Kılınç, M., Sener, O. & Karadavut, U. (1997). Hatay Koşullarında İkinci Ürün Tarımına Uygun Mısır Çeşitlerinin Belirlenmesi. Türkiye II. Tarla Bitkileri Kongresi, S: 153-157, 22-25 Eylül 1997, Samsun.
- Han, E. (2016). Bazı Mısır Çeşitlerinin Dane Verimleri ile Silaj ve Kalite Özelliklerinin Belirlenmesi. Ordu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tarla Bitkileri Anabilim Dalı. Yüksek Lisans Tezi s:77, Ordu.
- Kırtok, Y. (1998). Mısır Üretimi ve Kullanımı. Kocaoluk Basım ve Yayınevi, s.s.445, İstanbul.
- Koca, Y.O. & Ereku, O. (2011). Bazı melez mısır çeşitlerinin performanslarının belirlenmesi. Adnan Menderes Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, 8(2), 41-45.
- Konak, C. & Demir, İ. (1987). Mısır Koçan Kurduna Karşı Mukavemet Çalışmaları. TÜBİTAK, Türkiye Tahıl Sempozyumu, 6-9 Ekim 1987, s. 455-464, Bursa.
- Lauer, J.G., Carter, P.R., Wood, T.M., Diezel, G., Wiersma, D.W., Rand, R.E., & Mlynarek, M.J. (1999). Corn hybrid response to planting date in the Northern corn belt. Argonomy Journal, 91, 834-839.
- Özmen, İ. (2008). Bazı Melez Mısır Çeşit ve Genotiplerinin Değişik Ekim Bölgelerindeki Adaptasyon ve Uyum Yeteneklerinin Belirlenmesi Üzerine Araştırmalar. Doktora tezi. Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tarla Bitkileri Anabilim Dalı, İzmir.
- Sağlamtimur, T. (1989). Çukurova'da ekim zamanı ve bitki sıklığının üç mısır çeşidinde hasıl verimi ve bazı tarımsal karakterlere etkisi üzerinde araştırmalar. Çukurova Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, 4 (1), 119-133.
- Yılmaz, S., Gozubenli, H., Konuskan, O. & Atis, I. (2007). Genotype and plant density effects on corn (*Zea mays* L.) forage yield. Asian Journal of Plant Sciences, 6(3):538-541.
- Yılmaz, Ş., Gözübenli, H., Can E. & Atış İ. (1999). Hatay Koşullarında İkinci Ürün Olarak Yetiştirilebilecek Silajlık Mısır (*Zea mays* L.) Çeşitlerinin Belirlenmesi Üzerine Bir Araştırma. Türkiye III.Tarla Bitkileri Kongresi, s:295-299, Adana.

# TOPOLOGY OPTIMIZATION OF THE LOAD-CARRYING ELEMENT UNDER A CONCENTRATED LOAD

Fatih KARAÇAM<sup>1\*</sup>, Önder Can ARDA<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Trakya University, Department of Mechanical Engineering, Edirne, TURKEY

## Cite this article as:

Karaçam, F., Arda, Ö. C. (2021). Topology optimization of the load-carrying element under a concentrated load, *Trakya University Journal of Engineering Sciences*, 22(2), 57-64.

## Highlights

- Finite element methods (FEM) are very effective, and give reliable results in the analysis of engineering designs.
- Optimization methods can reduce the processing time.
- By use of the topology optimization, the weight of the designs, thus, the manufacturing costs can be reduced. The optimum design can be lighter and cheaper with the desired parameters.

## Article Info

### Article History:

Received:  
November 16, 2021

Accepted:  
December 11, 2021

### Keywords:

Load-carrying element;  
Static Analysis;  
Optimization;  
Topology Optimization.

## Abstract

Topology optimization (TO) is an important method for the conceptual design of the products. Traditional design methods generally depend on the knowledge and experience of the designer. In an optimization problem, the determination of the optimum design is a time consuming and challenging task, especially when the results are obtained by the trial and error method. Finite element based topology optimization methods have proven to be a robust algorithm in order to achieve the optimum geometries, and have been widely applied in computer aided design (CAD) software. In the study, initially, the static analysis of the load-carrying element has been carried out and the maximum von Mises stresses are obtained. Then, the topology optimization has been performed under the same operating and loading conditions. In the optimization process, minimum weight and maximum rigidity have been chosen as the design parameters, and then the load-carrying element is redesigned due to the results obtained after the optimization process.

## 1. Introduction

The main goal of the manufacturing process is to obtain the best product in the shortest time with the minimum cost. In the design process, the best design is expected to be able to satisfy the all conditions in the most appropriate way. Although there are too many solutions, the most important point is to have the optimum one among them. The purpose of the optimization process performed in any machine element, structure or system is to obtain the best design in the most appropriate way. In general, the structural optimization problems can be classified into four groups such as size, shape, topology and topography optimization. The oldest structural optimization method in the literature is size optimization which is also called as the parametric optimization. In structural optimization, the optimum design is obtained by changing the material distribution or the shape of the boundaries, starting from a given design topology, under certain boundary conditions and constraints. The design process is implemented in three stages. First, the optimum initial topology is created with the existing methods, then the topology is processed and converted into designs with the help of computational methods. Finally, shape optimization is applied to give a smooth shape to the contours and holes of the structure, and if necessary, the final dimensions of the structure are determined by the size optimization. Structural optimization has the potential to reduce not only the manufacturing costs, but also the manufacturing time. It has been widely applied in the engineering designs in recent years. Hajare and Jadhav designed a load-carrying mechanism that includes a hook. Afterwards, by use of the finite element method, the design of the hook was optimized by a specific engineering software (Hajare and Jadhav, 2020).

Niteen and Malbhage designed and optimized an excavator boom for the maximum reliability, considering the minimum weight and cost. A finite element analysis was used in order to keep the design

safe under all loading conditions (Niteen and Malbhage, 2017).

Ramesh et al. performed the topology optimization to reduce the lower arm weight of the excavator. To improve the lower arm model, low weight and high strength values were taken into consideration as the optimization parameters (Ramesh et al., 2017).

Sarode and Sarawade investigated the weight optimization of heavy-duty excavators within the certain limits. After the target values were obtained, the optimized model was manufactured and tested by a universal testing machine (Sarode and Sarawade, 2017).

Topology optimization in continuous structures can be performed by various methods. Generally, two important methods are used in most of the commercial engineering software.

The first method is the homogenization method which was initially developed by Bendsoe and Kikuchi. This method assumes that the finite elements that construct the model, contain gaps. In topology optimization, these gaps and their orientations are used as design variables (Bendsoe and Kikuchi, 1988).

The second method is the density method which was developed by Yang and Chung. They considered the material of each finite element as isotropic, and normalized the density of each element, and chose them as the design variables (Yang and Chung, 1993).

Rozvany et al. initially proposed a mathematical method used for the topology optimization which is called as the solid isotropic material with penalization (SIMP) method. The SIMP method estimates the optimum material distribution within a given design space for certain load situations, boundary conditions, production constraints, and performance requirements (Rozvany et al., 1992).

Eschenauer and Olho investigated the topology optimization of continuum structures. They searched for the parameters that improve the quality and reliability in a manner without exceeding a certain cost limit. The topology of a design was chosen by the engineer by inspiration of the previous designs traditionally, and the structure could then undergo shape or sizing optimization (Eschenauer and Olho, 2001).

In the study, the topology optimization of the load-carrying element has been performed by use of a computational software. Minimum weight and maximum rigidity have been chosen as the design parameters. Firstly, the static analysis of the load-carrying element has been carried out for a specific material, and the maximum von Mises stress and safety factor values have been calculated. Then, the topology optimization process has been performed, and non-parametric void model has been obtained. The model is revised according to the topology optimization results, and after the validation process, the maximum von Mises stress and safety factor values have been calculated once again, and compared with the initial results.

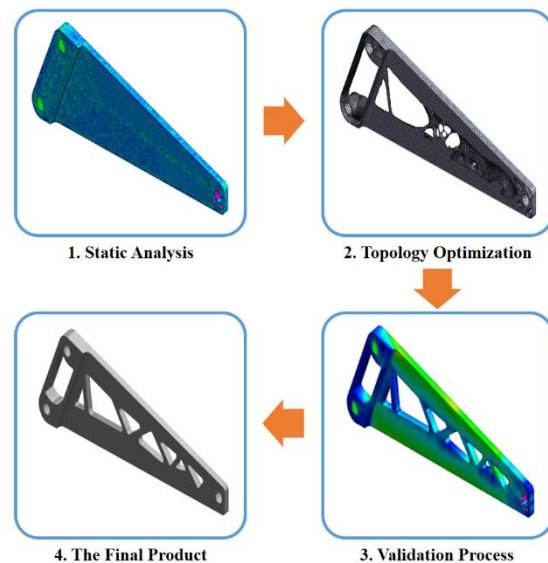
## 2. Optimization Method

Topology optimization was firstly explored in 1904 by an Australian engineer Anthony Michell. It is a mathematical method that optimizes a specific design area for a given set of load, boundary conditions, and constraints in order to maximize the system performance. The main objective of the topology optimization is to find out optimum shape of the structure with the highest strength or natural frequency while reducing the weight. Especially in recent years, due to the computers with high processors and the desire to make lighter but more durable parts, the use of this method has increased. Until recent years, the use of topology results in manufacturing fields required major changes, and it was almost impossible to put them into

production. Today, it is possible to obtain the topological results by many manufacturing methods such as casting, extrusion. The topology optimization algorithms have proven to be versatile, and been applied to many design problems in the engineering fields. In an optimization process, the optimum design should be in the exact dimensions, light in weight and have a long operating life. The models are often developed from an existing design or concept. In such cases, the dimensions or other inputs are defined by the design parameters. Thus, by use of the topology optimization in an optimization problem;

- The reliability of the design, and the performance of the product can be improved.
- The weight of the design can be lightened.
- The amount of chips and the processing energy in the product can be reduced.
- The product can be manufactured by use of a wide range of materials.

The workflow of topology optimization is presented in Figure 1.



**Figure 1.** The workflow of topology optimization



Firstly, a finite element static analysis is applied to the product. The static analysis results are evaluated, and then the topology optimization analysis is performed. After the topology optimization, a validation process is performed by subjecting the new model revised by the designer to the static analysis to verify. Finally, the design of the new product is created.

The topology optimization of a design can be summarized as in the following way:

- Selection of the commercial software that satisfies the required conditions.
- Static analysis of the design, and evaluation of the targeted values.
- Performing the topology optimization after the static analysis.
- Examining the geometrical properties after the topology optimization, and interpreting the results.
- Application of the geometrical properties to the new design.
- Evaluation of the targeted values.

The geometry produced by the topology optimization procedures is often complex and difficult (sometimes impossible) to be manufactured by traditional methods. Additional manufacturing methods, or 3D-printing technologies have undergone a rapid development in recent years which is often more relevant for engineering purposes (Posch et al., 2017).

The main advantage of the additive manufacturing is the freedom that it provides to the designer. Therefore, by use of the combination of topology optimization and additive manufacturing methods together, the parts can be optimized and manufactured accurately (Saadlaoui et al., 2017).

### 3. Static Analysis

In the study, the total weight of the load-carrying element is 477 kg, and ST-52 steel is chosen as the

material. The mechanical properties of ST-52 steel are presented in Table 1 with respect to the SI unit system.

**Table 1.** The mechanical properties of St-52 steel

Property	Value	Unit
Elastic Modulus	210000	N/mm <sup>2</sup>
Poisson's Ratio	0.28	-
Shear Modulus	79000	N/mm <sup>2</sup>
Mass Density	7800	kg/m <sup>3</sup>
Tensile Strength	450	N/mm <sup>2</sup>
Yield Strength	275	N/mm <sup>2</sup>

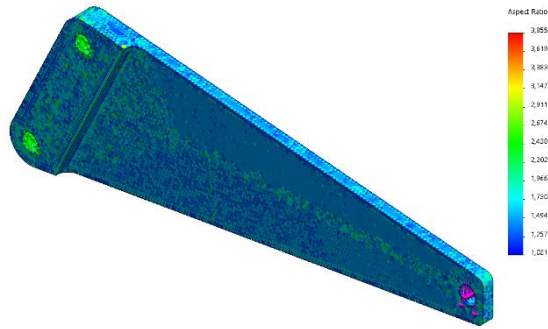
In Figure 2, the solid model of the load-carrying element is presented. The design requirements of the model are chosen as 10000 kg for the maximum load capacity, and 3 as for the safety factor.



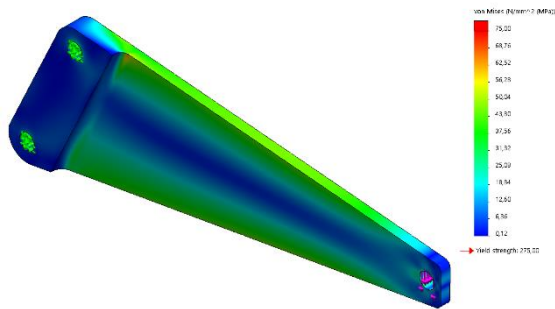
**Figure 2.** The solid model of the load-carrying element

In Figure 3, the mesh quality plot of the load-carrying element is presented. A mixed curvature-based mesh with high accuracy is selected in the model, and the minimum and maximum element sizes are defined to the system. During the meshing process, 101539 nodes and 65236 elements are created.

The maximum von Mises stress value is obtained as 75 MPa when the diverging points are excluded from the analysis as presented in Figure 4.



**Figure 3.** The mesh quality plot of the load-carrying element



**Figure 4.** The stress distribution of the model after the diverging points are excluded

Considering the yield strength of the material ( $YSM$ ) and the maximum von Mises stress ( $MVMS$ ) obtained from the static analysis, the safety factor ( $SF$ ) can be obtained as follows:

$$SF = \frac{YSM}{MVMS} \quad (1)$$

$$SF = \frac{273}{75} \quad (2)$$

$$SF = 3.64 \quad (3)$$

As the safety factor in Eq. 3 is higher than the limit value of 3, the topology optimization can be performed on the model.

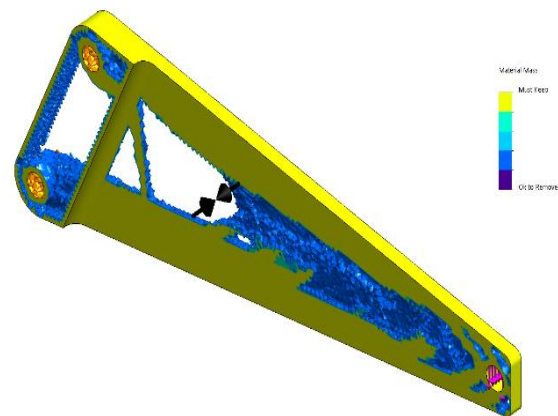
#### 4. Optimization Process

In the optimization process, the same design parameters with the static analysis, such as fixtures, loads and meshing, are directly transferred. A computer aided engineering software which is based on the finite

element method is utilized for the computational solution. Considering the targets and limitations, the main objective of the design is to reduce the mass by maintaining the best stiffness and weight ratio, and to set the limitation to a safety factor of 3 and above. In Figure 5 and 6, a non-parametric void model, and the areas to be kept or removed from the model after the optimization process, are presented respectively. The decision of the areas which can be kept (yellow) or removed (blue) from the model is made by the software.



**Figure 5.** The non-parametric void model after the optimization process



**Figure 6.** The areas to be kept and removed from the model after the optimization process

When the model is exported, it will be revised according to the results obtained from the topology optimization, and will be subjected to the validation process. After the validation process performed, the

model takes its final form. Depending on the model obtained from the previous steps, the load-carrying element is revised as in Figure 7 with the necessary revisions.



**Figure 7.** The revised solid model of the load-carrying element after the optimization process

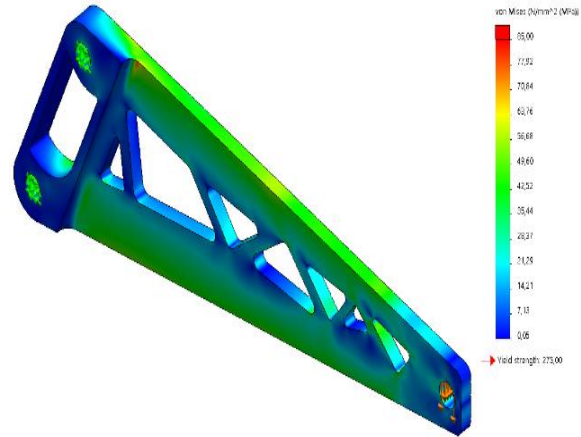
The static analysis section is reapplied to the revised solid model, and the results are evaluated again to check whether there is an error during the design revision, or an extra element has been removed from the model. The static analysis is repeated by applying the same support and load conditions to the revised model as shown in Figure 8.



**Figure 8.** The revised model for the validation process

After the topology optimization, the total weight of the load-carrying element is reduced to 342 kg. When the diverging points are excluded again from the analysis,

the maximum von Mises stress value is obtained as 85 MPa as presented in Figure 9.



**Figure 9.** The stress distribution of the revised model after the diverging points are excluded

Considering the evaluation of the post-validated results after the optimization process, the safety factor can be calculated from Eq. 1 as in the following way.

$$SF = \frac{273}{85} \quad (4)$$

$$SF = 3.21 \quad (5)$$

The safety factor is still higher than the limit value, so it is obvious that the load-carrying element can safely withstand the prescribed loading and boundary conditions.

## 5. Results and Discussions

The determination of the optimum design by trial-and-error method will cause a lot of time waste and manufacturing cost.

For this reason, it is inevitable to use the topology optimization in order to obtain the optimum model in a shorter time, more easily and economically.

In Table 2, the weight, maximum von Mises stress and safety factor values of the load-carrying element are compared before and after the topology optimization.

**Table 2.** The comparison of weight, von Mises stress and safety factor values before and after the topology optimization

	Weight (kg)	Maximum von Mises Stress (MPa)	Safety Factor
<b>Before TO</b>	477	75	3.64
<b>After TO</b>	342	85	3.21

The percentage difference of the weight and maximum von Mises stress values before and after the topology optimization can be calculated in the following way:

$$d\% = \left| \frac{(iv - fv)}{iv} \right| \times 100 \quad (6)$$

where “d%”, “iv” and “fv” correspond to the “percentage difference”, “initial value” and “final value” respectively.

After the optimization process, it can be concluded from Table 2 that the weight has been reduced by 28.3%. The load-carrying element has become lighter, but as it is expected, the maximum von Mises stress value has increased 13.33% due to the decrease in the weight of the load-carrying element. Although the maximum stress value has increased after the optimization process, the safety factor is still higher than the limit value.

The topology optimization should not be performed without the validation process, otherwise, the optimization process cannot be controlled, and generate unreliable results.

The study can be extended with different material and geometrical properties for various boundary and multi-loading conditions. For further studies, the dynamic behavior of the load-carrying element can be investigated. In this case, the fundamental natural

frequencies and critical buckling loads can be obtained in order to prevent the resonance and deformation in a specific load-carrying element under various loading and boundary conditions.

#### Conflict of Interest

There is no conflict of interest.

#### References

- Bendsoe, M. P., Kikuchi, N., (1988). Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 71, 197-224.
- Eschenauer, H. A., Olhoff, N., (2001). Topology optimization of continuum structures: A review. *Applied Mechanics Reviews*, 54 (4), 331-390.
- Hajare, P. R., Jadhav, S. M., (2020). Experimental stress analysis and optimization of crane lifting tackle. *International Journal of Recent Trends in Engineering & Research*, 7 (8), 215-221.
- Niteen, S. P., Malbhage, V. M., (2017). FEA analysis and optimization of boom of excavator. In *Proceedings of International Conference on Ideas, Impact and Innovation in Mechanical Engineering (ICIIME 2017)*, 5 (6), 625-632.
- Posch, G., Chladil, K., Chladil, H., (2017). Material properties of cmt-metal additive manufactured duplex stainless steel blade-like geometries. *Welding in the World*, 61 (5), 873-882.
- Ramesh, G., Krishnareddy, V. N., Ratnareddy, T., (2017). Design and optimization of excavator. *International Journal of Recent Trends in Engineering & Research*, 3 (4), 535-549.
- Rozvany, G. I. N., Zhou, M., Birker, T., (1992). Generalized shape optimization without homogenization. *Structural Optimization*, 4 (3), 250-252.

- Saadlaoui, Y., Milan, J. L., Rossi, J. M., Chabrand, P., (2017). Topology optimization and additive manufacturing: Comparison of conception methods using industrial codes. *Journal of Manufacturing Systems*, 43, 178-186.
- Sarode, R. B., Sarawade, S. S., (2017). Topology optimization of excavator bucket link, In Proceedings of 6th National Conference (RDME 2017), 12-26.
- Yang, R. J., Chung, C. H., (1993). Optimal topology design using linear programming. *Structural Optimization*, 68, 265-290.

# IŞINIM, RÜZGAR HIZI VE ÇEVRE SICAKLIĞININ PASİF SOĞUTUCULU FOTOVOLTAİK PANEL GÜÇ ÇIKIŞINA ETKİSİ

Ahmet Erhan AKAN<sup>1\*</sup>, Dinçer AKAL<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Çorlu Meslek Yüksekokulu, Makine Programı, Tekirdağ / Türkiye

<sup>2</sup>Trakya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Edirne / Türkiye

**Makale Künye Bilgisi:** Akan A.E. & Akal D. (2021). Işınım, Rüzgâr hızı ve Çevre sıcaklığının Pasif Soğutuculu Fotovoltaik Panel Güç Çıkışına Etkisi, *Trakya Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 22(2), 65-72.

## Öne çıkanlar

- Pasif konveksiyonel soğutucu kanatçık
- Atmosferik koşulların fotovoltaik çıkış gücüne etkisi
- Fotovoltaik panellerin çıkış gücü iyileştirilmesi

Makale Bilgileri	Öz
<b>Makale Tarihi:</b> Geliş: 27 Aralık 2021 Kabul: 29 Aralık 2021	Bu çalışmada, fotovoltaik panellerin çıkış gücünü olumsuz olarak etkileyen yüksek çalışma sıcaklıklarını düşürebilmek amacı ile panellerin alt yüzeylerine yerleştirilen alüminyum kanatçıkların konveksiyonel soğutmadaki etkileri çevre sıcaklığı, rüzgâr hızı ve ışınım parametrelerine bağlı olarak değişimi incelenmiştir. Bu amaçla, Trakya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi yerleşkesine kurulan deney düzeneği kullanılmıştır. Deneysel çalışma Temmuz (2020) ayında 31 gün boyunca yapılmış ve elde edilen deneysel veriler 10'ar dakika aralıklar ile kayıt altına alınmıştır. Çalışmadan elde edilen sonuçlara göre güneş panelinde, pasif soğutucu alüminyum kanatçıkların kullanılması durumunda, panel çıkış gücünde %9,07'lik bir artış sağlandığı tespit edilmiştir. Ayrıca soğutma amaçlı kanatçık bulunduran panelin çıkış gücüne, çevre sıcaklığının %3-11 aralığında, rüzgar hızının %7-12 aralığında, güneş ışınımının ise %6-12 aralığında pozitif etkisi olduğu belirlenmiştir.
<b>Anahtar Kelimeler:</b> Fotovoltaik; Çevre sıcaklığı; Rüzgar hızı; Işınım şiddeti; Çıkış gücü.	

## EFFECTS OF RADIATION, WIND SPEED AND AMBIENT TEMPERATURE ON PASSIVE COOLER PHOTOVOLTAIC PANEL POWER OUTPUT

Article Info	Abstract
<b>Article History:</b> Received: December 27, 2021 Accepted: December 29, 2021	In this study, the effects of aluminum fins placed on the lower surfaces of the panels on convection cooling are investigated depending on the ambient temperature, wind speed and radiation parameters in order to reduce the high operating temperatures that adversely affect the output power of the photovoltaic panels. For this purpose, the experimental setup established in the Trakya University Engineering Faculty campus was used. The experimental study was carried out for 31 days in July (2020) and the experimental data obtained were recorded at 10-minute intervals. According to the results obtained from the study, it has been determined that an increase of 9.07% in the panel output power is achieved when passive cooling aluminum fins are used in the solar panel. In addition, it has been determined that the output power of the panel with cooling fins has a positive effect between 3-11% of the ambient temperature, 7-12% of the wind speed, and 6-12% of the solar radiation.
<b>Keywords:</b> Photovoltaic; Ambient temperature; Wind speed; Radiation intensity; Output power.	

## 1. Giriş

Yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde güneş enerjisi temiz enerji üretmek ve düşük karbon ekonomisine geçişin en iyi alternatifleri arasında yer almaktadır. Ancak güneş enerji sistemlerinden elde edilecek maksimum elektrik miktarı birçok unsura bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Bu anlamda santral kurulumları öncesi bölgenin saha iklim koşulları dikkate alınarak fizibilite çalışmalarının yapılması ve doğru işletme şartlarının sağlanması büyük önem arz etmektedir. Aksi halde sistem verimliliği düşecek ve yatırımın geri dönüş süresi uzayacaktır.

Güneş enerji sistemlerinde elektrik dönüşüm verimliliğinin azalmasına neden olan en önemli faktörlerden biriside fotovoltaik panellerde yüzey sıcaklığının artmasıdır. Sıcaklık artışı sistem verimliliğini düşürmekle birlikte fotovoltaik panel kullanım ömrünü de azaltmaktadır. Bu nedenle çevre sıcaklığının artması ile birlikte fotovoltaik hücrelerde elektrik enerjisi üretimi esnasında sıcaklık artışı ile panel üzerindeki ısı birikmesi engellenmelidir. Fotovoltaik panel yüzey sıcaklığının düşürülmesi için literatürde çok farklı soğutma uygulamaları yapılmasına rağmen verim arttırmaya yönelik araştırmalar devam etmektedir. Bu çalışmalardan birinde fotovoltaik modül performansının güneş ışınımı ve rüzgar hızı değişimi ANSYS programı ile analiz edilmiş ve fotovoltaik panel arka yüzeyine uygulanan düzlemsel reflektörlü kanatçıklar arasındaki adımın artması ile modül sıcaklığının azaldığı ve daha yüksek verim elde edildiği belirlenmiştir (Elbreki, vd. 2020). Alüminyum kanatçık plaka kullanılarak doğal konveksiyon ile soğutulan fotovoltaik panellerin performansını artırmak için yapılan deneysel bir çalışmada ise optimum alüminyum kanatçık plaka tasarımı sayesinde güneş enerjisinden elektrik eldesinde dönüşüm verimliliğinin % 1,75 arttığı tespit edilmiştir (Mays, vd. 2017). Benato ve Stoppato (2019) tarafından yapılan bir çalışmada, minimum su kullanımı ile soğutma yaparak, modül sıcaklığını

düşürecek bir tasarım incelenmiştir. Tasarlanan sistemde, 90°'lik açı ile 3 adet su püskürtme nozulu kullanılarak maliyet ve soğutma optimizasyonu sağlanmış ve modül sıcaklığı düşürülmüştür. Shalaby, vd. (2021) tarafından yapılan bir çalışmada ise, çıkış güçleri aynı olan 2 adet fotovoltaik panelden birisi standart halde iken diğer panelin arka yüzeyine su soğutma sistemi uygulanmıştır. Standart panelde % 17,4 verim elde edilirken su soğutmalı panelin yüzey sıcaklığı düşürülerek verimin % 19,8 değerine ulaştığı görülmüştür. Perez, vd. (2021) tarafından yapılan bir çalışmada ise fotovoltaik modüllerinin çalışma sıcaklığını düşürmek için panel alt yüzeyine alüminyum kanatlı pasif soğutucu profil önerilmiştir. Farklı genişlikte iki adet kanat profili prototip olarak üretilerek termal performansı incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre basınç düşüşü önemli ölçüde azaltılarak değişken yönlü bir rüzgar akışında termal tepkinin daha tutarlı olduğu tespit edilmiştir. Önerilen alüminyum pasif soğutucu modeli ile sıcaklık 7°C daha düşürülmüş ve geleneksel geometrideki soğutuculara göre daha iyi sonuçlar elde edildiği bildirilmiştir. Bhakre, vd. (2021) tarafından yapılan bir çalışmada ise su soğutmalı sistemlerde güneş panellerinin modül sıcaklığının düşürülmesi için ön ve arka yüzey soğutmasının kombine etkisi incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre güneş panellerinin ön yüzeylerine su verilmesinin modül sıcaklığını daha fazla düşürdüğü ve bu yöntemle fotovoltaik panel yüzeyi temizlendiği için optik kayıpların da azaldığı tespit edilmiştir. Akman (2019) tarafından yapılan bir araştırmada, fotovoltaik hücrelerin aşırı ısınmasını önlemek ve verim artışı sağlamak için su kanallı ve su serpantinli farklı iki soğutma sistemi karşılaştırılmıştır. Su kanallı sistemin serpantinli sisteme göre daha avantajlı olduğu belirlenmiştir. Kerem, vd. (2020) tarafından yapılan bir araştırmada, güneş paneli yüzey soğutma işleminin elektriksel verime etkisi incelenmiştir. Bunun için panelin üst kısmına yerleştirilen bir boru ile soğutma suyu homojen bir şekilde panel yüzeyine gönderilerek

soğutma sağlanmıştır. Bu şekilde %14,47 verim artışı sağlandığı ifade edilmiştir. Mutlu, (2021) tarafından yapılan bir çalışmada ise fotovoltaik panellerin verimini etkileyen çevresel parametreler incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre güneş ışınımı ve rüzgâr hızının panel verimi üzerinde oldukça etkili olduğu ifade edilmiştir. Das, (2019) tarafından yapılan bir çalışmada ise çevresel faktörlerin fotovoltaik panel performansına etkisi incelenmiştir. Buna göre sıcaklığın panel verimini düşürdüğü, rüzgar hızının, ışınımın ve hava basıncının panel verimine pozitif etkisi olduğu ve nemin ise paslanmalara sebep olduğu sonucuna varılmıştır. Amajama, (2016) tarafından yapılan bir çalışmada, güneş panellerinden elde edilen çıkış voltajının, hava basıncındaki artışla arttığı sonucuna varılmıştır.

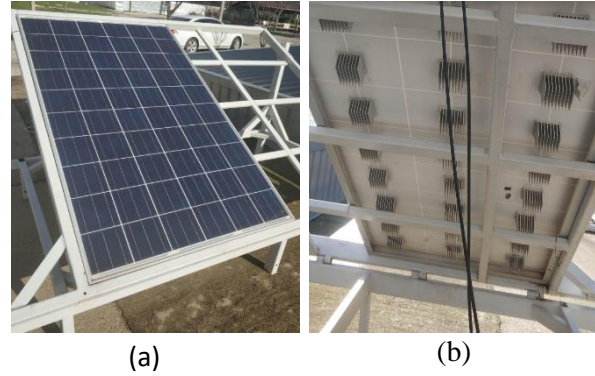
Güneş enerji sistemlerinde verimin azalmaması için panel yüzey sıcaklık artışının önlenmesi esastır. Bu sebeple, fotovoltaik modüllerin arka yüzeyinde mevcut olan termal enerjinin azaltılması için hava akımı oluşturmak bir çözümdür. Böylece panel alt yüzeyi altındaki sıcak hava taşınım yolu ile uzaklaştırılmış olur. Bu işlem için az elektrik enerjisi tüketen DC fanlar kullanılabilir (Joshi, vd. 2008).

Bu çalışmada, fotovoltaik modüllerin çalışma sıcaklıklarının düşürülerek daha verimli çalışmalarını sağlamak amacı ile modüllerin arkasına yerleştirilen alüminyum kanatçıkların konveksiyonel soğutmadaki etkileri çevre sıcaklığı, rüzgar hızı ve güneş ışınımı parametreleri altında incelenmiştir. Elde edilen sonuçların panel soğutma teknolojilerinin geliştirilmesine yararlı olacağı düşünülmektedir.

## 2. Materyal ve Metot

Güneş enerjisinden elektrik üretimi için Trakya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi yerleşkesinin güney yönündeki sahada özel taşıyıcı bir sistem üzerine 25°eğim açısı ile özdeş 2 adet 260 watt gücünde polikristal fotovoltaik panel kurulumu yapılmıştır. Bu

deney düzeneğindeki bir panel standart halde iken diğer panelin arka yüzeyine sıcaklığın düşürülmesi amacıyla Şekil 1’de görüldüğü gibi 80x60 mm ölçüsünde 30 adet alüminyum pasif soğutucu uygulanmıştır. Bu çalışmada saat 09.00 ile 18.00 arasında 10 dakikalık periyodlarla her iki panelden elde edilen güç değerleri kaydedilmiştir.



Şekil 1. Fotovoltaik panelin (a) ön yüzü, (b) arka yüzü

Deneyler Edirne coğrafi şartlarında Temmuz (2020) ayı boyunca sürmüştür. Ayrıca panellerden elde edilen enerji ölçümleri ile birlikte eş zamanlı olarak mevcut sistemin kurulu olduğu sahadaki güneş ışınımı, çevre sıcaklığı ve rüzgâr hızı değerleri de ölçülerek kaydedilmiştir. Her iki panelden elde edilen güç çıkış değerlerine göre 30 gün sonunda toplam enerji miktarı hesaplanmıştır. Kurulumun yapıldığı sahadaki çevresel şartların, her iki panelin (Standart fotovoltaik panelin ve arka yüzeyine alüminyum pasif soğutucu uyguladığımız panelin) güç çıkışına etkisi analiz edilerek ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

Fotovoltaik modüllere ait teknik özellikler Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Fotovoltaik panelin teknik özellikleri

Güneş Modül Tipi	JKM 260P-60
Maximum Güç ( $P_{max}$ )	260 W
Güç Toleransı	0~+3%
Maximum Güç Voltajı ( $V_{mp}$ )	31,1 V
Maximum Güç Akım ( $I_{mp}$ )	8,37 A
Açık Devre Voltajı ( $V_{oc}$ )	38,1 V
Kısa Devre Akımı ( $I_{sc}$ )	8,98 A



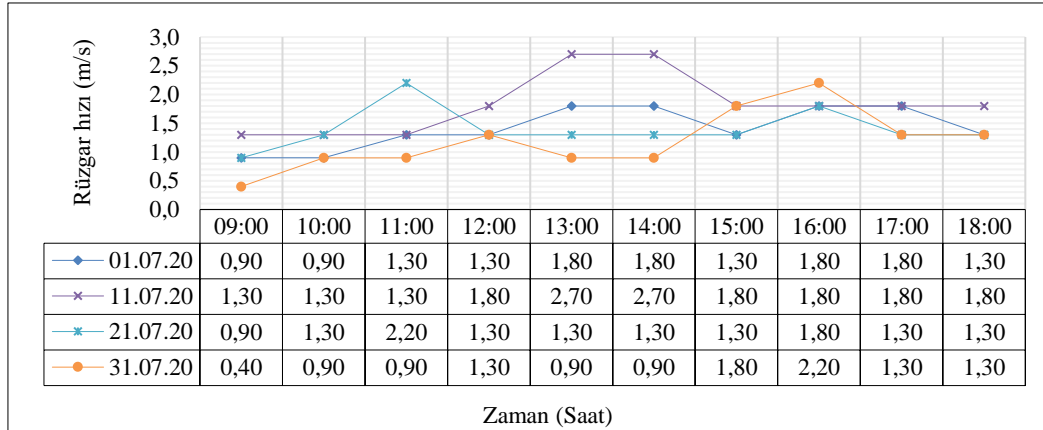
Nominal Çalışma Hücresi Sıcaklığı (NOCT)	45±2°C
Maximum Sistem Voltajı	1000 VDC
Maximum Sigorta Değeri	15 A
Çalışma Sıcaklığı	-40°C~+8°C
Uygulama Sınıfı	A
Ağırlık	18,5 kg
Boyutlar	1650×992×40 (mm)

### 3. Bulgular ve Tartışma

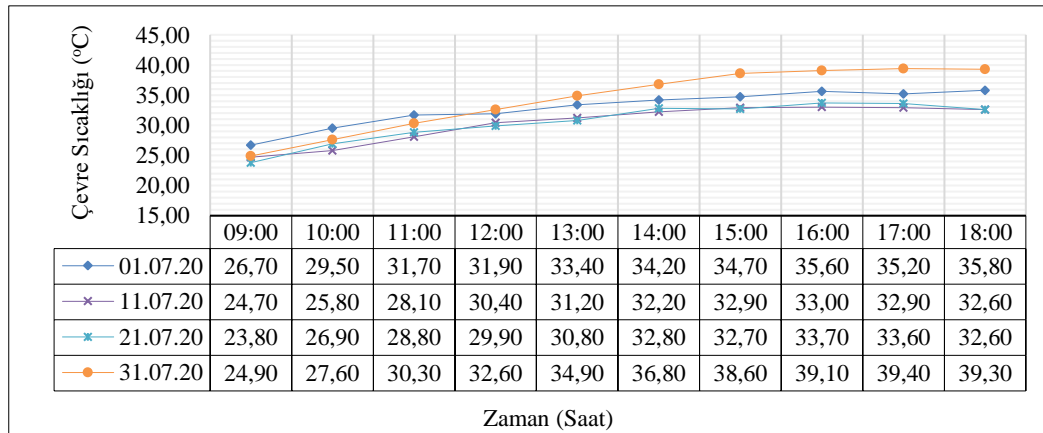
Deneyin gerçekleştirildiği Temmuz ayı boyunca, 10'ar dakika aralıklarla elde edilen panel verileri ile çevresel parametre değerlerinin daha kolay analiz edilmesi amacı ile Temmuz ayı 10'ar günlük periyotlara bölünmüş ve 01-11-21 ve 31 Temmuz tarihleri arasındaki deneysel verilerin ortalamaları baz alınmıştır. Buna göre incelenen çevresel parametre değerleri ile her iki panel tipine ait ilgili bulgular sırası ile sunulmuştur.

### 3.1. Gözlemlenen çevresel parametreler

Modüllerin arkasına yerleştirilen pasif soğutucu sayesinde konveksiyonel soğutmaya etkisi incelenen rüzgar hızı, çevre sıcaklığı ve ışınım şiddeti parametrelerine ait deneysel verilerden elde edilen grafikler Şekil 2-4'de sırasıyla sunulmuştur. Şekil 2'de, seçilen dört farklı gün için saatlik ortalama rüzgar hızı değişimleri görülmektedir. Gün içinde rüzgar hızı şiddetinin genellikle saat 11:00-15:00 aralığında arttığı, günün son saatlerinde ise genellikle 1,30-1,80 m/s hızlarında estiği tespit edilmiştir. Şekil 3'de ise çevre sıcaklığının seçilen günlerdeki saatlik ortalama değerleri sunulmuştur. Buna göre, çevre sıcaklığının gün içerisinde ışınımına bağlı olarak saat 15:00'a kadar sürekli artmakta olduğu ve saat 15:00'dan sonra ise kısmen azalmaya başladığı tespit edilmiştir.



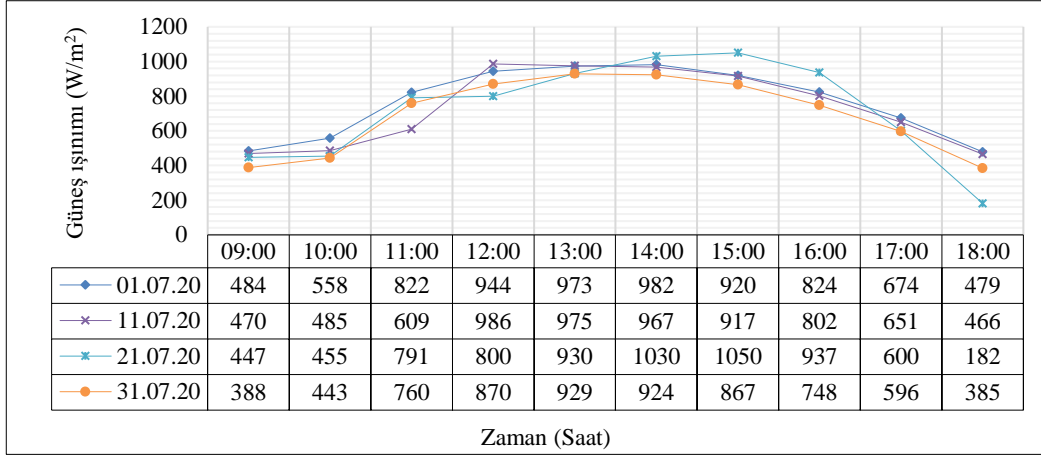
Şekil 2. Seçilen dört gün için saatlik ortalama rüzgar hızı değerleri



Şekil 3. Seçilen dört gün için saatlik ortalama çevre sıcaklık değerleri

Şekil 4’de ise ışınım şiddetinin gün içindeki saatlik ortalama değişimi verilmiştir. Şekil 3’de verilen çevre sıcaklığındaki artış eğiliminin ışınım şiddetindeki artış sebebi ile olduğu ifade edilmişti. Şekil 4 incelendiğinde

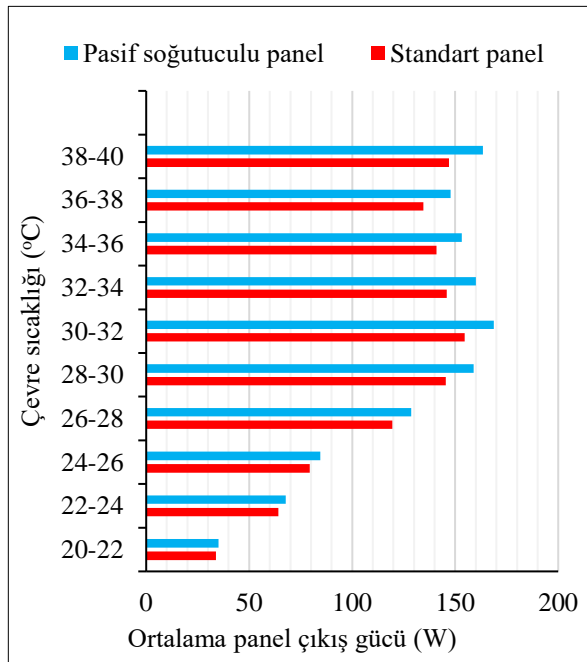
ise gün içerisinde ışınım şiddeti değerlerinin, saat 15:00’a kadar artış gösterdiği, saat 15:00’dan sonra ise azalmaya başladığı açıkça görülmekte ve bu tespiti doğrulamaktadır.



Şekil 4. Seçilen dört gün için saatlik ortalama güneş ışınım şiddeti değerleri

### 3.2. Çevre sıcaklığı etkisinin incelenmesi

Deneyin yapıldığı Temmuz ayı boyunca 10’ar dakika aralıklar ile kayıt altına alınan tüm verilerden yararlanılarak çevre sıcaklığının 20 °C - 40°C arasında değiştiği kayıt edilmiştir. Buna göre çevre sıcaklığı ve panel çıkış gücü arasındaki ilişkiyi veren grafik Şekil 5’de verilmiştir.



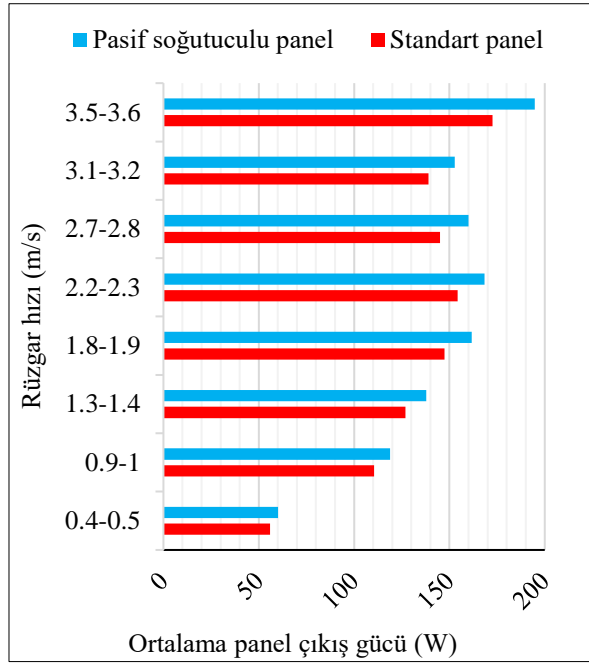
Şekil 5. Çevre sıcaklığı ile panel çıkış gücünün değişimi

Şekil 5 incelendiğinde, pasif soğutucu kullanılan panelin tüm çevre sıcaklığı aralıklarına karşılık soğutucu kullanılmayan standart panelin çıkış gücüne göre daha fazla çıkış gücü ürettiği görülmektedir. Bu iki panel tarafından üretilen çıkış gücündeki farkın çevre sıcaklığının artışı ile daha fazla olduğu da tespit edilmiştir. Çevre sıcaklığının 20-22°C aralığında olduğu en düşük çevre sıcaklığı grubunda paneller arasında üretilen çıkış gücü farkının 1,284 W/m<sup>2</sup> olduğu, 28-30 C aralığında ise 13,531 W/m<sup>2</sup> olduğu ve en yüksek çevre sıcaklığı grubu olan 38-40°C aralığında ise panel çıkış güçleri arasındaki farkın 16,429 W/m<sup>2</sup> olduğu tespit edilmiştir. Genel olarak değerlendirildiğinde ise standart fotovoltaik panele pasif soğutucu kanatçık ilavesi ile çevre sıcaklığının tüm değer aralıkları göz önüne alındığında panel çıkış gücüne katkısının %3,80 ile %11,18 aralığında değiştiği tespit edilmiştir.

### 3.3 Rüzgar hızı etkisinin incelenmesi

Deney esnasında kayıt altına alınan rüzgar hızları 0,4 ile 3,6 m/s aralığında değişim göstermiştir. Analiz için rüzgar hızları 0,1 m/s lik 8 gruba ayrılarak

incelenmiştir. Rüzgar hızı – panel çıkış gücü arasındaki ilişki Şekil 6’da sunulmuştur.



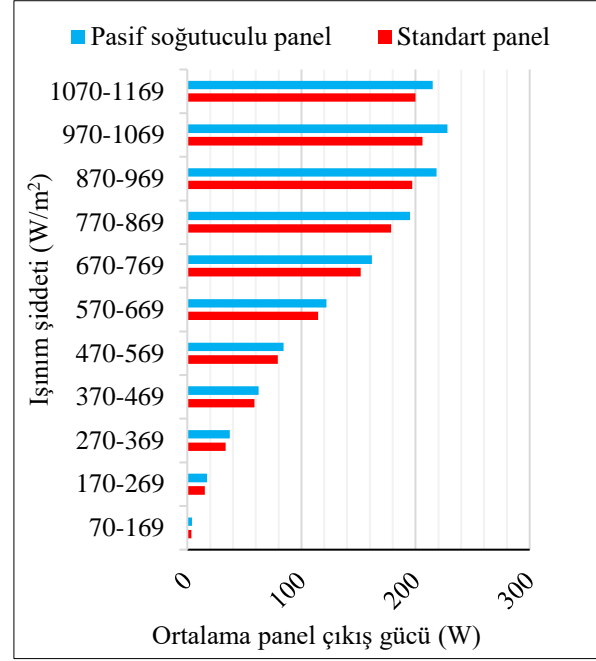
Şekil 6. Rüzgar hızı ile panel çıkış gücünün değişimi

Şekil 6 incelendiğinde, pasif soğutucu kanatçık kullanımının tüm rüzgar hızı gruplarında standart panelden elde edilen çıkış gücüne göre daha iyi sonuçlar sergilediği görülmektedir. Ayrıca artan rüzgar hızlarında soğutucu kanatçığın daha iyi performans göstererek panel çıkış gücüne pozitif etki gösterdiği de Şekil 6’dan anlaşılmaktadır. 0,4-0,5 m/s aralığındaki rüzgar hızı grubunda, pasif soğutuculu panelin standart panele göre  $4,22 \text{ W/m}^2$ , 2,2-2,3 m/s aralığında  $14,03 \text{ W/m}^2$ , en yüksek rüzgar hızı grubu olan 3,5-3,6 m/s rüzgar hızı grubunda ise  $22,12 \text{ W/m}^2$  daha fazla çıkış gücü elde ettiği tespit edilmiştir. Genel olarak değerlendirildiğinde, pasif soğutucu kanatçık kullanımı ile fotovoltaik panelden elde edilen çıkış gücündeki artışın %7,55 ile %12,81 aralığında olduğu tespit edilmiştir.

### 3.4. Güneş ışınımı etkisinin incelenmesi

Deney süresince 10’ar dakika aralıklar ile kayıt altına alınan ışınım verilerinin değerleri 70 ile  $1169 \text{ W/m}^2$  arasında değişim göstermiştir. Işınım etkisinin daha

kolay incelenebilmesi için ışınım değerleri  $100 \text{ W/m}^2$ ’lik gruplara ayrılarak incelenmiştir. Bu durumda elde edilen ışınım ile panel çıkış gücü arasındaki ilişkiyi veren grafik Şekil 7’de sunulmuştur.



Şekil 7. Güneş ışınımı ile panel çıkış gücünün değişimi

Şekil 7 incelendiğinde, pasif soğutuculu panelden elde edilen çıkış gücünün, standart panelden elde edilen çıkış gücüne nazaran tüm ışınım şiddeti gruplarında daha fazla olduğu görülebilmektedir. En düşük ışınım şiddeti grubu olan  $70-169 \text{ W/m}^2$ ’lik grupta pasif soğutucu panelin, standart panelden  $0,39 \text{ W/m}^2$  daha fazla çıkış gücü sağladığı belirlenmiştir. Ayrıca en yüksek ışınım şiddeti grubu olan  $1070-1169 \text{ W/m}^2$ ’lik grup incelendiğinde ise pasif soğutuculu grubun standart panelden  $15,10 \text{ W/m}^2$  daha fazla çıkış gücüne sahip olduğu tespit edilmiştir. Genel olarak panel çıkış gücüne ışınım etkisi değerlendirildiğinde ise bu etkinin rüzgar hızı ve çevre sıcaklığı gibi kısmen doğrusal bir oranda olmadığı belirlenmiştir. Örneğin gruplandırılmış ışınım değerleri arasında 970 ile  $1169 \text{ W/m}^2$ ’lik grupta üretilen çıkış gücü değerlerinin diğer tüm ışınım grupları tarafından sağlanan çıkış gücü değerlerinden fazla olduğu tespit edilmiştir. Buradan ışınım şiddetinin gereğinden fazla olması durumunda

ise çevre ve panel sıcaklığını arttırdığı için çıkış gücünün azalmasına sebep olduğu tespit edilmiştir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, pasif soğutucu kanatçık kullanan panelin çıkış gücü, standart panel çıkış gücüne göre %6,09 ile %12,02 arasında değişen ışınımına bağlı çıkış gücü artışı sağladığı tespit edilmiştir.

#### 4. Sonuçlar

Bu çalışmada, fotovoltaik panellerin çalışma sıcaklıklarının ilave bir enerji gereksinimi duyulmaksızın alüminyum kanatçık yardımı ile konveksiyonel olarak soğutulması, çevre sıcaklığı, rüzgar hızı ve güneş ışınımı açısından araştırılmıştır.

Temmuz ayında gerçekleşen deneyden elde edilen sonuçlara göre soğutma kanatçığı bulunmayan standart panelden toplam 37,983 kW, soğutma kanatçıklı panelden ise toplam 41,429 kW çıkış gücü elde edilmiştir. Bu bağlamda genel olarak değerlendirildiğinde alüminyum soğutma kanatçıkları fotovoltaik panelin çıkış gücünde %9,07'lik bir artış sağlamıştır.

İncelenen çevresel parametrelerin etkileri değerlendirildiğinde ise çevre sıcaklığının fotovoltaik panel çıkış gücüne katkısının %3,8-11,18 aralığında, rüzgar hızının fotovoltaik panel çıkış gücüne katkısının %7,55-12,81 aralığında olduğu tespit edilmiştir. Güneş ışınımının fotovoltaik panel çıkış gücüne etkisi incelendiğinde ise soğutucu kanatçık sayesinde standart fotovoltaik panele göre panel çıkış gücünde %6,09-12,02 aralığında bir artış olduğu tespit edilmiştir.

Elde edilen bulgulardan, panellerinin çıkış gücüne çevre sıcaklığı, rüzgar hızı ve ışınım miktarının etkili olduğu, fotovoltaik modül sıcaklıklarının azaltılması ile daha fazla çıkış gücü elde edilebileceği belirlenmiştir. Bu sebeple fotovoltaik modül sıcaklıklarının optimum koşullarda tutulabilecek, daha farklı tip kanatçık modelleri veya soğutma

sistemleri ile güneş panellerinde verimin artacağı sonucuna varılmıştır.

#### Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

#### Referanslar

- Akman, Ö. (2019). Fotovoltaik Panellerde Sıcaklığın Elektriksel Verime Etkileri ve Termal Güç Eldesi, *Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Enerji Sistemleri Mühendisliği, Karabük*.
- Amajama, J. "Effect of Air Pressure on the Output of Photovoltaic Panel and Solar Illuminance (or Intensity)", *International Journal of Scientific Engineering and Applied Science*, 2 (8), s. 139-144, Ağustos, 2016.
- Benato, A., Stoppato, A. "An Experimental Investigation of a Novel Low-Cost Photovoltaic Panel Active Cooling System", *Energies*, 12 (8), 1448, 2019.
- Bhakre, S. S., Sawarkar, P. D., Kalamkar, V. R. "Performance evaluation of PV panel surfaces exposed to hydraulic cooling –A review", *Solar Energy*, 224 (2021), 1193-1209, 2021.
- Das, M. R. "Effect of Different Environmental Factors on Performance of Solar Panel", *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, 8(11), s.15-18, 2019.
- Elbreki, A. M., Sopian, K., Fazlizan, A., Ibrahim, A. "An innovative technique of passive cooling PV module using lapping fins and planner reflector", *Case Studies in Thermal Engineering*, 19(2020), 100607, 2020.
- Joshi, A. S., Tiwari, A., Tiwari, G. N., Dincer, I., Reddy, B. V. "Performance evaluation of a hybrid

photovoltaic thermal (PV/T) (glass-to-glass) system”, *International Journal of Thermal Sciences*, 48 (2009), s. 154–164, 2009.

Kerem, A., Atik, M., Bayram, A. “Fotovoltaik (PV) Panel Sisteminde Yüzeý Soğutma İşleminin Elektrik Üretimine Etkisinin Deneysel İncelenmesi”, *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, 12(2), s. 565-578., 2020.

Mays, A. E., Ammar, R., Hawa, M., Akroush, M. A., Hachem, F., Khaled, M., Ramadan, M. “Improving Photovoltaic Panel Using Finned Plate of Aluminum”, *International Conference on Technologies and Materials for Renewable Energy, Environment and Sustainability*, TMREES17, 21-24 April 2017, Beirut Lebanon, 2017.

Mutlu, G. “Çevresel Parametrelerin Güneş Santrallerinin Verimine Etkisinin Parametrik İncelenmesi”, *Yüksek Lisans Tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Bursa, 2021.

Perez, J. G. H., Carrillo, J. G., Bassam, A., Banuelos, M. F., Lopez, L. D. P. “Thermal performance of a discontinuous finned heatsink profile for PV passive cooling”, *Applied Thermal Engineering*, 184 (2021), 116238, 2021.

Shalaby, S. M., Elfakharany, M. K., Moharram, B. M., Abosheisha, H. F. “Experimental study on the performance of PV with water cooling”, *Energy Reports*, 8(1), s.957-961, 2022.

# DEĞİŞKEN KESİTLİ KİRİŞLERİN GENEL SINIR ŞARTLARI İÇİN TİTREŞİM ANALİZİ

Vedat TAŞKIN<sup>1</sup>, İsmail VARSERİN<sup>2</sup>, Pınar Aydan DEMİRHAN<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Trakya Üniversitesi, Edirne, TÜRKİYE

<sup>2</sup>Fen Bilimleri Enstitüsü, Trakya Üniversitesi, Edirne, TÜRKİYE

## Makale Künye Bilgisi:

Taşkın V., Varserin İ., Demirhan P.A. (2021). Değişken Kesitli Kirişlerin Genel Sınır Şartları İçin Titreşim Analizi, *Trakya Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 22(2), 73-86.

## Öne Çıkanlar

- Mühendislik uygulamalarında farklı geometrilere ve farklı yapısal özelliklere sahip kirişler sıklıkla kullanılmaktadır.
- Dinamik yük altındaki makine elemanları veya yapılar için doğal frekanslar ve mod şekilleri önemli parametrelerdir.
- Değişken kesitli izotropik kirişin titreşim davranışı incelendiğinde, kirişin eğimindeki değişimin titreşim frekansını ve mod şekillerini etkilediği görülmektedir.

Makale Bilgileri	Öz
<b>Makale Tarihi:</b> Geliş: 14 Aralık 2021 Kabul: 21 Aralık 2021	Bu çalışmada değişken kesitli izotropik kirişin serbest titreşimi incelenmiştir. Seçilen kiriş genişliği üstel olarak değişken olduğundan yönetici denklemler uzay koordinatlarında benzer kesit geometrileri için adi diferansiyel denklemler haline indirgenmiştir. Kiriş titreşimine ait analitik çözümler ankastre, basit mesnetli ve serbest uçlu olmak üzere bütün sınır koşulları için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Mod şekilleri ve doğal frekanslar her bir sınır şartı için bulunmuştur. Sonuçlar kiriş kesitindeki değişimin mod şekillerini ve doğal frekansları etkilediğini göstermektedir. Titreşimin frekansı genişleyen kesitlerde artmakta daralan kesitlerde ise azalmaktadır.
<b>Anahtar Kelimeler:</b> Kiriş; Titreşim; Değişken Kesit; Mod Şekilleri; Doğal Frekanslar.	

## VIBRATION ANALYSIS OF VARIABLE CROSS-SECTION BEAM WITH GENERAL BOUNDARY CONDITIONS

Article Info	Abstract
<b>Article History:</b> Received: December 14, 2021 Accepted: December 21, 2021	In this study, the free vibration of an isotropic beam with variable cross-section is investigated. Since the selected beam width is exponentially variable, the governing equations are reduced to ordinary differential equations for similar section geometries in space coordinates. Analytical solutions for the vibration of the beam are calculated separately for all boundary conditions including cantilever, simple and free end. Mode shapes and natural frequencies have been found for each boundary condition. The results show that the change in the cross-section of the beam affects the mode shapes and natural frequencies. The frequency of the vibration increases in expanding sections and decreases in narrowing sections.
<b>Keywords:</b> Beam; Vibration; Variable cross-section; Mode Shapes; Natural Frequencies	

## 1. Giriş

Mühendislik uygulamalarında kullanılan taşıyıcı sistemler çubuk, kiriş, mil, levha, plak, kafes sistem veya kabuk şeklindedir. Bu sistemlerin farklı zorlamalar altında statik ve dinamik davranışlarının belirlenmesi, güvenli endüstriyel tasarım açısından çok önemlidir. Çeşitli mühendislik uygulamalarında kirişler yapı elemanı olarak kullanılan taşıyıcı elemanlardır. Teknolojik gelişmelerle birlikte farklı kullanım alanlarının ortaya çıkmasıyla farklı kiriş geometrilerine ve farklı yapısal özelliklerde kirişlere ihtiyaç duyulmaktadır. Farklı geometri ve yapısal özelliklere sahip bu kirişlerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi önem teşkil etmektedir (Varserin, 2015).

Bu çalışmada ele alınan yapı kiriştir. Kirişler boyu doğrultusundaki eksenine dik kuvvetlerin etkisi altında bulunan taşıyıcı elemanlardır. Kirişler, birçok mühendislik uygulamasında yapı bileşeni olarak kullanılır ve literatürde düzgün izotropik kirişlerin çapraz titreşimi hakkında birçok araştırma yer almaktadır (Gorman, 1975). Düzgün olmayan kirişler, düzgün kirişlere oranla kütle ve kuvvetin daha iyi ya da uygun şekilde dağılmasını sağlayabilir, dolayısıyla mimari, robot teknolojisi, havacılık ve diğer yenilikçi mühendislik uygulamalarındaki özel işlevsel gereklilikleri sağlayabilir. Düzgün kirişler, çeşitli çalışmaların konusunu oluşturur. Cranch ve Adler (1956), dört çeşit dikdörtgen en kesiti bulunan serbest düzgün olmayan kirişlerin doğal frekansları ve mod şekilleri için (Bessel fonksiyonları ve/veya kuvvet serileri açısından) kapalı yapıda çözümler sunmuştur. Conway ve Dubil (1965), kesik koni kirişleri için benzer kapalı yapı çözümleri elde etmiştir. Heidebrecht (1967), Fourier sinüs serilerini kullanarak frekans denkleminde benzer olmayan destekli kirişlerin ortalama doğal frekanslarını ve mod şekillerini belirlemiştir. Branch (1968), ikincil alan momentinin lineer olarak alanla bağlantılı olmasını sağlayacak şekilde farklılık göstermesine izin verilen değişken en kesiti bulunan kirişlerin enine salınımının temel

frekansını optimize etmiştir. Mabie ve Rogers (1972), kirişin en kesit alanının çok terimli değişimini ve eylemsizlik momentini dikkate alarak, ikili konik kirişin doğal frekansını elde etmiştir. Bailey (1978), düzgün olmayan dirsekli kirişin doğal frekansını elde etmek amacıyla Hamilton Yasası'ndan elde edilen frekans denklemini sayısal olarak çözmüştür.

Olhoff ve Parbery (1984), iki bitişik doğal frekans arasındaki farkı maksimize etmek için tasarım değişkeni olarak en kesit alanını kullanmıştır. Gupta (1985), sonlu eleman yöntemini kullanmak suretiyle konik kirişlerin doğal frekansını ve mod şeklini sayısal olarak tespit etmiştir. Jategaonkar ve Chehil (1989), uzunlukları boyunca sürekli ve süreksiz olarak farklılık gösteren en kesitli düzgün olmayan kirişler üzerine çalışmalar yapmıştır. Naguleswaran (1992, 1994a), Frobenius yöntemine dayalı doğrudan mod şekli çözümüyle tekli konik kirişlerin ve ikili konik kirişlerin ortalama doğal titreşimlerini tespit etmiştir. Naguleswaran (1994b), ayrıca bir kenarı eksenel koordinatın karekökü kadar farklılık gösteren düzgün kirişin dikdörtgen en kesitini incelemiştir. Laura ve ekibi (1996), genişliği sabit olan ve kalınlığı çift doğrusal olarak farklılık gösteren Bernoulli kirişlerinin doğal frekansını belirlemek için ortalama sayısal yaklaşımlardan faydalanmıştır. Datta ve Sil (1996), genişliği sabit olan ve derinliği doğrusal olarak farklılık gösteren konsol kirişlerinin doğal frekansını sayısal olarak belirlemiştir. Caruntu (2000), dikdörtgen en kesitli kirişlerin doğrusal olmayan titreşimlerini ve parabolik kalınlık değişimini incelemiştir. Yakın zamanda, Elishakoff ve Johnson (2005), eksenel olarak düzgün olmayan malzeme özellikleri bulunan bir kirişin titreşim sorunlarını irdelemiştir. Jang ve Bert (1989a, 1989b) ile Elishakoff (2005), kademeli kirişlerin serbest titreşimine ilgi göstermiş ve bu konuda kapsamlı incelemelerde bulunmuşlardır. Ece, Aydoğdu ve Taşkın (2007), en kesiti sürekli değişen izotropik kirişlerin doğal frekanslarını ve mod şekillerini (ilk 5 mod) 3 sınır şartı için (ankastre-

ankastre, basit mesnet-basit mesnet, ankastre-serbest uç) incelemişlerdir. Aydoğdu ve Filiz (2010) kesiti parçalı ve sürekli değişen kiriş ve çubukların serbest titreşim analizini Ritz metodunu kullanarak yapmışlardır. Akgöz ve Civalek (2013) malzeme özellikleri ve kesiti değişen Euler-Bernoulli kirişin serbest titreşim analizini Modifiye Birleşik Gerilme Teorisi'ni kullanarak yapmıştır. Mirzabeigy (2014) Diferansiyel Transform metodunu kullanarak elastik temele oturtulmuş değişken kesitli kirişin serbest titreşim analizini yapmıştır. Çalım (2016) değişken kesitli fonksiyonel derecelendirilmiş Timoshenko kirişlerin serbest titreşim analizini Tamamlayıcı Fonksiyonlar Yöntemi kullanarak yapmıştır. Khaniki ve Hashemi (2017) değişken kesitli üniform olmayan mikro kirişlerin serbest titreşimi için bir analitik çözüm sunmuştur. Çalım (2017) dönel atalet ve kayma deformasyonlarının etkisini de hesaba katarak aksel fonksiyonel derecelendirilmiş değişken kesitli Timoshenko kirişin titreşim analizini yapmıştır. Sohani ve Eipakchi (2018) pertürbasyon tekniğini kullanarak değişken kesitli Timoshenko ve Euler-Bernoulli kirişlerin serbest titreşim analizini yapmıştır. Sınır vd. (2018) pertürbasyon ve diferansiyel kareleme metodlarını kullanarak değişken kesitli fonksiyonel derecelendirilmiş Euler-Bernoulli kirişin serbest ve zorlanmış titreşim analizini sunmuşlardır. Demir (2018) sıcaklığa bağlı olarak malzeme özellikleri değişen, değişken kesitli bir çubuğun titreşim analizini yapmıştır. Lohar vd. (2016) elastik zemine oturtulmuş değişken kesitli fonksiyonel derecelendirilmiş kirişlerin serbest titreşimi için yarı analitik bir yöntem kullanmıştır. Soltani ve Asgarian (2019) Winkler-Pasternak elastik zemine oturtulmuş değişken kesitli fonksiyonel derecelendirilmiş kirişin serbest titreşim ve stabilite analizini yeni bir hibrit yaklaşım kullanarak yapmıştır. Ghannadiasl (2019) elastik zemine oturtulmuş üniform olmayan Timoshenko kirişin serbest titreşim analizini yapmıştır.

Dinamik yük altındaki makine elemanları veya yapılar için doğal frekanslar ve mod şekilleri önemli parametrelerdir. Bir makine elemanı veya bir yapının tasarlanırken doğal frekansları ile mod şekillerinin ve dolayısıyla titreşimin genliğinin bilinmesiyle bu karakteristikler istenen sınırların dışında ise makine elemanının tasarımı değiştirilerek karakteristiklerin istenen sınırların içinde kalması sağlanabilir.

Önceki çalışmalarda, en kesiti sürekli değişen izotropik kirişlerin titreşim karakteristiklerinin önemli özellikleri olduğu ve Ece, Aydoğdu ve Taşkın (2007) tarafından kısmi olarak incelendiği görülmektedir. Mevcut çalışmada, genişliği üstel olarak farklılık gösteren izotropik kirişin serbest titreşimi tüm sınır şartları için incelenmiştir.

Çalışmanın amacı, kirişin bütün sınır koşulları için titreşim davranışını tanımlayan analitik çözümler elde etmek ve sürekli değişen en kesitin doğal frekans ile mod şekilleri üzerindeki etkilerini tespit etmektir.

## 2. Analiz

Bu bölüm iki kısımdan oluşmaktadır. İlk kısımda değişken kesitli izotropik kirişe ait yönetici denklemlerin elde edilmesi, ikinci kısımda ise bu denklemlere ait katsayıların her bir sınır şartı için belirlenmesi yer almaktadır.

### 2.1. Yönetici Denklemlerin Elde Edilmesi

Kirişlere ait en temel teori Euler-Bernoulli teorisidir. Kirişlere ait hareket denkleminin elde edilmesi için küçük bir kiriş parçası seçilerek hesaplamalar yapılır.

Kiriş kesitinin dönmesi, kiriş ötelenmesine göre çok küçük bir değer olduğundan kesitin dönmesi ihmal edilir. Aynı şekilde kayma deformasyonuna oranla çok küçük olduğundan açılma burulma da ihmal edilir (Şekil 1).

Kirişin orta ekseninin yer değiştirmesi  $w$  olmak koşulu ile düzlem parçalarının, kiriş orta kısmına göre düzlem



olarak kaldığı varsayılarak, kesit alanındaki herhangi bir noktanın yer değiştirme bileşenleri şu şekilde ifade edilebilir.

$$u = -z \frac{dw(x,t)}{dx}, v = 0, w = w(x,t) \quad (1)$$

Yer değiştirmeler çok küçük olduğu için  $\tan \alpha \approx \alpha$  kabul edilebilir.

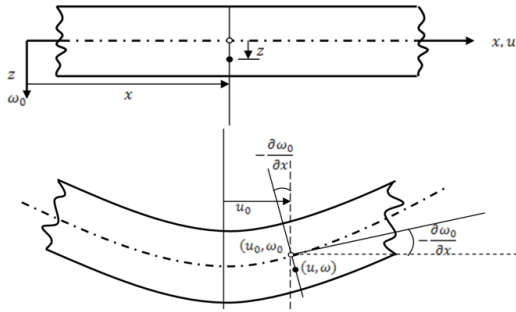
Bu yer değiştirmelere göre gerilme ve deformasyon bileşenleri şu şekildedir.

$$\varepsilon_{xx} = \frac{du}{dx} = -z \frac{d^2w}{dx^2} \quad (2)$$

$$\varepsilon_{yy} = \varepsilon_{zz} = \varepsilon_{xy} = \varepsilon_{yz} = \varepsilon_{zx} = 0 \quad (3)$$

$$\sigma_{xx} = \frac{du}{dx} = -EZ \frac{d^2w}{dx^2} \quad (4)$$

$$\sigma_{yy} = \sigma_{zz} = \sigma_{xy} = \sigma_{yz} = \sigma_{zx} = 0 \quad (5)$$



**Şekil 1.** Şekil değişikliği altında kirişe ait yer değiştirmeler (Demirhan, 2016)

Gerilme enerjisi şu şekilde yazılabilir;

$$\begin{aligned} \Pi &= \frac{1}{2} \iiint_V (\sigma_{xx}\varepsilon_{xx} + \sigma_{yy}\varepsilon_{yy} + \sigma_{zz}\varepsilon_{zz} \\ &\quad + \sigma_{xy}\varepsilon_{xy} + \sigma_{yz}\varepsilon_{yz} \\ &\quad + \sigma_{zx}\varepsilon_{zx}) dV \\ &= \frac{1}{2} \int_0^l EI(x) \left( \frac{d^2w}{dx^2} \right)^2 dx \end{aligned} \quad (6)$$

Kinetik enerji şu şekilde yazılabilir;

$$\begin{aligned} T &= \frac{1}{2} \int_0^l \iint_A \rho \left( \frac{dw}{dt} \right)^2 dA(x) dx \\ &= \frac{1}{2} \int_0^l \rho A(x) \left( \frac{dw}{dt} \right)^2 dx \end{aligned} \quad (7)$$

Enine yük  $f(x,t)$  tarafından yapılan iş;

$$W = \int_0^l f(x,t)w(x,t)dx \quad (8)$$

Hamilton Prensipleri'ne göre;

$$\delta \int_{t_1}^{t_2} (\Pi - T - W) dt = 0 \quad (9)$$

Burada  $\delta$ ,  $t_1$  ve  $t_2$  anları arasındaki varyasyondur.

Denklem 6, 7 ve 8 Denklem 9'da yerine yazılırsa;

$$\begin{aligned} \delta \int_{t_1}^{t_2} \left( \frac{1}{2} \int_0^l EI(x) \left( \frac{d^2w}{dx^2} \right)^2 dx \right. \\ \left. - \frac{1}{2} \int_0^l \rho A(x) \left( \frac{dw}{dt} \right)^2 dx \right. \\ \left. - \int_0^l f(x,t)w(x,t)dx \right) dt = 0 \end{aligned} \quad (10)$$

Denklem 10 düzenlenerek kirişe ait enine titreşim denklemleri elde edilir.

$$\frac{d^2}{dx^2} \left( EI(x) \frac{d^2w}{dx^2} \right) + \rho A(x) \frac{d^2w}{dt^2} = f(x,t) \quad (11)$$

Değişken kesitli izotropik kiriş için boyutsuzlaştırılmış değişken parametreleri şu şekildedir:

$$\begin{aligned} t &= \frac{1}{L^2} \sqrt{\frac{EI_0^*}{\rho A_0^*}} t^*, x = \frac{x^*}{L}, I = \frac{I^*}{I_0^*}, w \\ &= \frac{w^*}{W}, A = \frac{A^*}{A_0^*} \end{aligned} \quad (12)$$

Burada  $t$  zaman,  $L$  kirişin boyu,  $E$  kirişin elastisite modülü,  $A_0$  ve  $I_0$   $x=0$  konumdaki (yani kirişin sol ucundaki) kesit alanı ve atalet momenti,  $w$  herhangi bir referans uzaklık,  $\rho$  kirişin yoğunluğu ve  $x$  kirişin sol ucuna olan uzaklık şeklinde tanımlanmaktadır. “\*” işaretleri ait olduğu simgelerin boyutsuz haldeki değerlerini ifade etmektedir.

Mevcut çalışmada  $E$  ve  $\rho$  sabit olup serbest titreşim inceleneceği için  $f(x,t)=0$  olacaktır. Buna göre Denklem 11 çözümlerse;

$$\frac{I(x)}{A(x)} \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{I'(x)}{A(x)} \frac{\partial^3 w}{\partial x^3} + \frac{I''(x)}{A(x)} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = 0 \quad (13)$$

Boyutsuz formda yönetici denklem elde edilir.

Denklem 11'in çözümü şu şekilde kabul edilebilir:

$$w(x,t) = F(x)G(t) \quad (14)$$

Denklem 13 ve Denklem 14'ün toplamı iki tane diferansiyel denklem takımından oluşur.

$$\frac{I(x)}{A(x)} F^{(4)} + 2 \frac{I'(x)}{A(x)} F''' + \frac{I''(x)}{A(x)} F'' - \omega^2 F = 0 \quad (15)$$

$$G'' + \omega^2 G = 0 \quad (16)$$

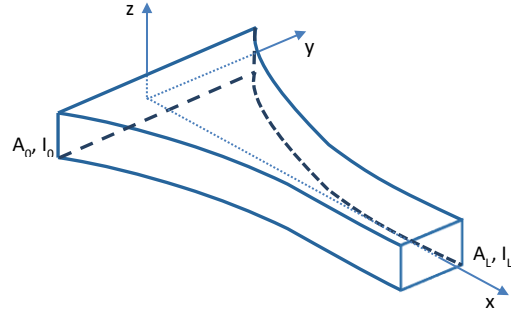
Burada  $\omega$  gerçek sabittir ve  $\omega^2 = (\Omega^2 \rho L^4 / EI_0)$  şeklinde tanımlanır.  $\Omega$  radyal frekanstır.

Denklem 16'nın çözümü bilindiği üzere şu şekilde yazılır:

$$G(t) = C_1 \cos(\omega t) + C_2 \sin(\omega t) \quad (17)$$

Denklem 15'in çözümü için kirişin kesit geometrisinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada hem kesit alanı hem de atalet momenti, genişliğin karakteristiği ile doğru orantılı olacak şekilde ele alınmıştır. Kirişin yüksekliği ve kalınlığına ait karakteristik özellikler sabit alınıp, genişliğe ait karakteristik özelliğin kirişin

uzunluğu boyunca üstel olarak değiştiği varsayılmıştır (Şekil 2).



**Şekil 2.** Genişliği üstel olarak değişen kirişin şematik gösterimi

Böylece  $A(x) = e^{\delta x}$  ve  $I(x) = e^{\delta x}$  şeklinde ifade edilir. Burada  $\delta$  eğrilik parametresidir.

$$\frac{e^{\delta x}}{e^{\delta x}} F^{(4)} + 2 \frac{\delta e^{\delta x}}{e^{\delta x}} F''' + \frac{\delta^2 e^{\delta x}}{e^{\delta x}} F'' - \omega^2 F = 0 \quad (18)$$

Düzenlenirse:

$$F^{(4)} + 2\delta F''' + \delta^2 F'' - \omega^2 F = 0 \quad (19)$$

Denklem 19'un çözümü şu şekilde elde edilir:

$$F(x) = e^{-\frac{\delta}{2}x} \left[ A_0 \cos\left(\frac{\beta}{2}x\right) + B_0 \sin\left(\frac{\beta}{2}x\right) + C_0 \cosh\left(\frac{\alpha}{2}x\right) + D_0 \sinh\left(\frac{\alpha}{2}x\right) \right] \quad (20)$$

Burada:  $\beta = \sqrt{4\omega_0 - \delta^2}$ ,  $\alpha = \sqrt{4\omega_0 + \delta^2}$  'dır.

Denklem 20 yönetici denklemdir. Sınır koşulları bu denklem üzerinden uygulanarak gerekli sınır şartlarına ait sabitlerin bulunmasıyla serbest titreşim denklemleri her bir sınır koşulu için elde edilir.

Bu çalışmada kiriş mesnet çeşitleri basit(B), ankastre(A) ve serbest(S) olarak ele alınmıştır. Bu sınır koşullarının kombinasyonları olan 6 çeşit sınır şartı için

katsayıların bulunmasına ilişkin çözümler aşağıdaki şekildedir.

## 2.2. Yönetici denklemlerin sınır koşullarında uygulanması ve katsayıların elde edilmesi

Ankastre-Ankastre Sınır Koşulları (A-A)

$$F(0) = 0 \quad F'(0) = 0 \quad (\text{sol mesnet})$$

$$F(1) = 0 \quad F'(1) = 0 \quad (\text{sağ mesnet})$$

A-A sınır koşulu için titreşim denklemini aşağıdaki gibi elde edilir.  $cc = \cos(\beta/2)$  ve  $ss = \sin(\beta/2)$  olmak üzere,

$$\left[ e^{\alpha} \cdot [\alpha \cdot \beta \cdot cc - \delta^2 \cdot ss] - 2 \cdot e^{\frac{\alpha}{2}} \cdot \alpha \cdot \beta + \alpha \cdot \beta \cdot cc + \delta^2 \cdot ss \right] = 0 \quad (21)$$

Ankastre-Basit Sınır Koşulları (A-B)

$$F(0) = 0 \quad F'(0) = 0 \quad (\text{sol mesnet})$$

$$F(1) = 0 \quad F''(1) = 0 \quad (\text{sağ mesnet})$$

A-B sınır koşulu için titreşim denklemini aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\left[ e^{\alpha} \cdot [\beta \cdot (\delta \cdot \alpha - 2 \cdot \omega_0) \cdot cc + (2 \cdot \omega_0 \cdot \alpha - \delta^3) \cdot ss] - 2 \cdot \delta \cdot e^{\frac{\alpha}{2}} \cdot \alpha \cdot \beta + \beta \cdot (\delta \cdot \alpha + 2 \cdot \omega_0) \cdot cc + (2 \cdot \omega_0 \cdot \alpha + \delta^3) \cdot ss \right] = 0 \quad (22)$$

Ankastre-Serbest Sınır Koşulları (A-S)

$$F(0) = 0 \quad F'(0) = 0 \quad (\text{sol mesnet})$$

$$F''(1) = 0 \quad F'''(1) = 0 \quad (\text{sağ mesnet})$$

A-S sınır koşulu için titreşim denklemini aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\left[ 8 \cdot \omega_0 \cdot e^{\alpha} \cdot [(\alpha - 2 \cdot \delta) \cdot \beta \cdot cc + \delta \cdot (3 \cdot \delta - 2 \cdot \alpha) \cdot ss] + e^{\frac{\alpha}{2}} \cdot \alpha \cdot \beta \cdot ((\alpha + \delta)^2 \cdot (-\delta \cdot \alpha + \delta^2 + 2 \cdot \omega_0) + 8 \cdot \omega_0) - (\alpha + \right. \quad (23)$$

$$\left. \delta)^2 \cdot [\beta \cdot ((\delta^2 - \omega_0) \cdot \alpha - \delta^3) \cdot cc - \delta \cdot (\beta \cdot \alpha - \delta^3 + 2 \cdot \delta \cdot \omega_0) \cdot ss] \right] = 0$$

Basit-Basit Sınır Koşulları (B-B)

$$F(0) = 0 \quad F''(0) = 0 \quad (\text{sol mesnet})$$

$$F(1) = 0 \quad F''(1) = 0 \quad (\text{sağ mesnet})$$

B-B sınır koşulu için titreşim denklemini aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\left[ e^{\alpha} \cdot [\delta^2 \cdot \alpha \cdot \beta \cdot cc + (8 \cdot \omega_0^2 - \delta^4) \cdot ss] - 2 \cdot \delta^2 \cdot e^{\frac{\alpha}{2}} \cdot \alpha \cdot \beta + \delta^2 \cdot \alpha \cdot \beta \cdot cc + (\delta^4 - 8 \cdot \omega_0^2) \cdot ss \right] = 0 \quad (24)$$

Basit-Serbest Sınır Koşulları (B-S)

$$F(0) = 0 \quad F''(0) = 0 \quad (\text{sol mesnet})$$

$$F''(1) = 0 \quad F'''(1) = 0 \quad (\text{sağ mesnet})$$

B-S sınır koşulu için titreşim denklemini aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\begin{aligned} & e^{\alpha} \cdot (\alpha - \delta)^2 \cdot [\beta \cdot (2 \cdot \alpha^3 \cdot \delta + \alpha^2 \cdot (5 \cdot \delta^2 - \beta^2) + 2 \cdot \alpha \cdot \delta \cdot (2 \cdot \delta^2 - \beta^2) - \beta^2 \cdot (\beta^2 + 3 \cdot \delta^2)) \cdot cc + (\alpha^3 \cdot (\beta^2 - \delta^2) + 2 \cdot \alpha^2 \cdot \delta \cdot (2 \cdot \beta^2 - \delta^2) + \alpha \cdot \beta^2 \cdot (\beta^2 + 7 \cdot \delta^2) + 2 \cdot \beta^2 \cdot \delta^3) \cdot ss] - \\ & 4 \cdot \alpha \cdot \beta \cdot \delta \cdot e^{\frac{\alpha}{2}} \cdot (\alpha^4 - 2 \cdot \alpha^2 \cdot \delta^2 + \beta^4 + 2 \cdot \beta^2 \cdot \delta^2 + 2 \cdot \delta^4) + (\alpha + \delta)^2 \cdot [\beta \cdot (2 \cdot \alpha^3 \cdot \delta + \alpha^2 \cdot (\beta^2 - 5 \cdot \delta^2) + 2 \cdot \alpha \cdot \delta \cdot (2 \cdot \delta^2 - \beta^2) + \beta^2 \cdot (\beta^2 + 3 \cdot \delta^2)) \cdot cc + (\alpha^3 \cdot (\beta^2 - \delta^2) + 2 \cdot \alpha^2 \cdot \delta \cdot (\delta^2 - 2 \cdot \beta^2) + \alpha \cdot \beta^2 \cdot (\beta^2 + 7 \cdot \alpha^2) - 2 \cdot \beta^2 \cdot \delta^3) \cdot ss] = 0 \end{aligned} \quad (25)$$

Serbest-Serbest Sınır Koşulları (S-S)

$$F''(0) = 0 \quad F'''(0) = 0 \quad (\text{sol mesnet})$$

$$F''(1) = 0 \quad F'''(1) = 0 \quad (\text{sağ mesnet})$$

S-S sınır koşulu için titreşim denklemini aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\left[ e^{\alpha} \cdot [\alpha \cdot \beta \cdot cc - \delta^2 \cdot ss] - 2 \cdot e^{\frac{\alpha}{2}} \cdot \alpha \cdot \beta + \alpha \cdot \beta \cdot cc + \delta^2 \cdot ss \right] = 0 \quad (26)$$

### 3. Sayısal Sonuçlar

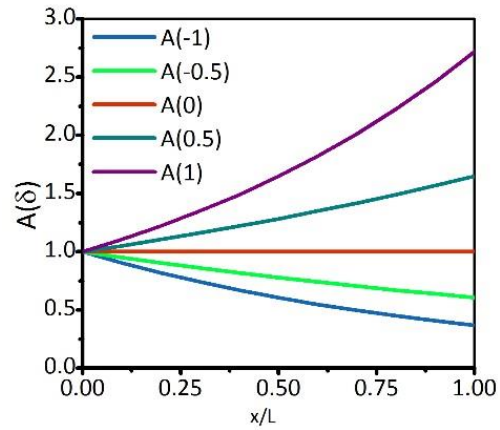
Bu bölümde genişliği üstel olarak değişen izotropik kirişin serbest titreşimi için nümerik sonuçlar sunulmuştur. Şekil 3'te kirişin kesit alanının uzunluk koordinatı boyunca üstel olarak değişimi eğrilik katsayısına bağlı olarak verilmiştir. Eğrilik katsayısı  $\delta$ 'nın negatif değerleri için kiriş kesiti giderek daralırken, pozitif değerleri için kiriş kesiti genişlemektedir. Eğrilik katsayısının sıfıra eşit olduğu durum üniform kesitli kirişi temsil etmektedir. Tablo 1'de  $\delta = -1$  eğrilik değeri için ilk beş titreşim modunun doğal frekansları literatürde yer alan çalışmalarla birlikte sunulmuştur. Cranch ve Adler [3] tarafından seri açılımları ile elde edilmiş yaklaşık sonuçlar, Tong ve Tabarrok [36] tarafından nümerik olarak elde edilmiş sonuçlar ile Ece, Aydoğdu ve Taşkın [22] tarafından üretilen sonuçların, sunulan çalışmanın sonuçları ile oldukça uyumlu olduğu görülmüştür.

Tablo 2'de tüm sınır şartlarına ait farklı eğrilik katsayıları (-0,5 0 0,5) ve kiriş uzunluğu boyunca farklı noktalar ( $x/L=0$  0,25 0,5 0,75 1) için frekans değerleri verilmiştir.  $M(\delta)$  ilgili sınır şartına ait mod şekli için titreşim değerlerini ifade etmektedir.

Tablo 3'te her bir sınır şartı için ilk on doğal frekans değeri (0 0,5 1 -0,5 -1) eğrilik değerleri için verilmiştir. Simetrik desteklenmiş kirişlerde (AA, BB ve SS) eğrilik katsayısının işaretinin sonucu değiştirmedığı, frekans değerlerinin işaretten bağımsız olduğu görülmüştür.

Şekil 4-7'de farklı eğrilik değerleri (-0,5 0 0,5) için tüm sınır koşullarına ait 1, 2, 5 ve 8. doğal titreşim modlarının değişimi verilmiştir. Grafiklerin çiziminde frekans değerlerinin genlik derecesi 1 olacak şekilde normalizasyonu yapılmıştır. Ankastre-Ankastre (AA) desteklenmiş ve Serbest-Serbest (SS) kirişte incelenen

tüm doğal titreşim modları için işaretten bağımsız olarak eğrilik katsayısı arttıkça doğal frekans değerlerinin arttığı görülmektedir. Basit-Basit (BB) desteklenmiş kirişte işaretten bağımsız olarak eğrilik katsayısı arttıkça doğal frekans değerlerinin azaldığı görülmektedir. Ankastre-Basit (AB), Ankastre-Serbest (AS) ve Basit-Serbest (BS) desteklenmiş kirişlerde eğrilik katsayısının -1 değeri için doğal frekans değeri en büyük iken, eğrilik katsayısı arttıkça frekans değerinin düştüğü görülmüştür.



Şekil 3. Kiriş kesit alanının uzunluk boyunca eğrilik katsayısına bağlı değişimi

**Tablo 1.**  $\delta = -1$  için doğal frekanslar

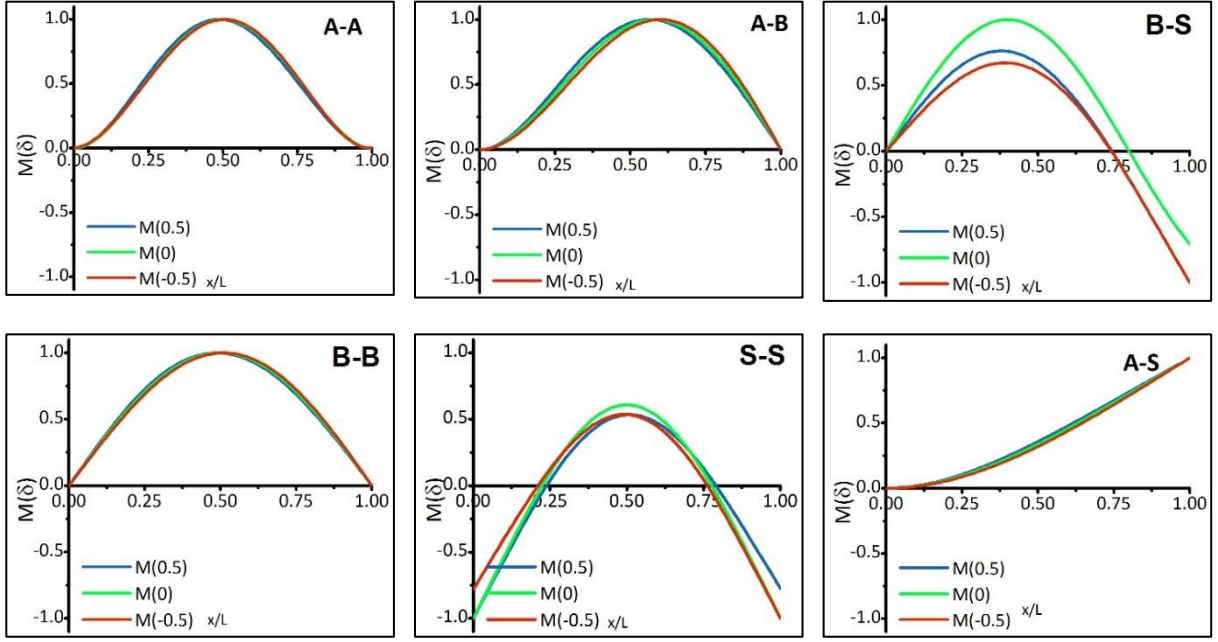
Sınır Koşulu	Referans	1.mod	2.mod	3.mod	4.mod	5.mod
AS	Cranch ve Adler (1956)	4,73500	24,20250	63,85000	-	-
	Tong ve Tabarrok (1995)	4,73470	24,20050	63,86080	123,09100	-
	Ece, Aydoğdu ve Taşkın (2007)	4,72298	24,20168	63,86448	123,09790	202,06870
	Şimdiki Çalışma	4,73490	24,20181	63,86449	123,09790	202,06876
AA	Ece, Aydoğdu ve Taşkın (2007)	22,51167	61,85968	121,10799	200,07411	298,77661
	Şimdiki Çalışma	22,51168	61,85969	121,10798	200,07412	298,77662
BB	Ece, Aydoğdu ve Taşkın (2007)	9,77291	39,57036	88,97052	158,08418	246,92650
	Şimdiki Çalışma	9,77290	39,57036	88,97051	158,08417	246,92640

**Tablo 2.** Tüm sınır koşulları için (-0,5 0 0,5) eğrilik değerine karşılık 1, 2, 5 ve 8. modları için doğal frekans değerleri

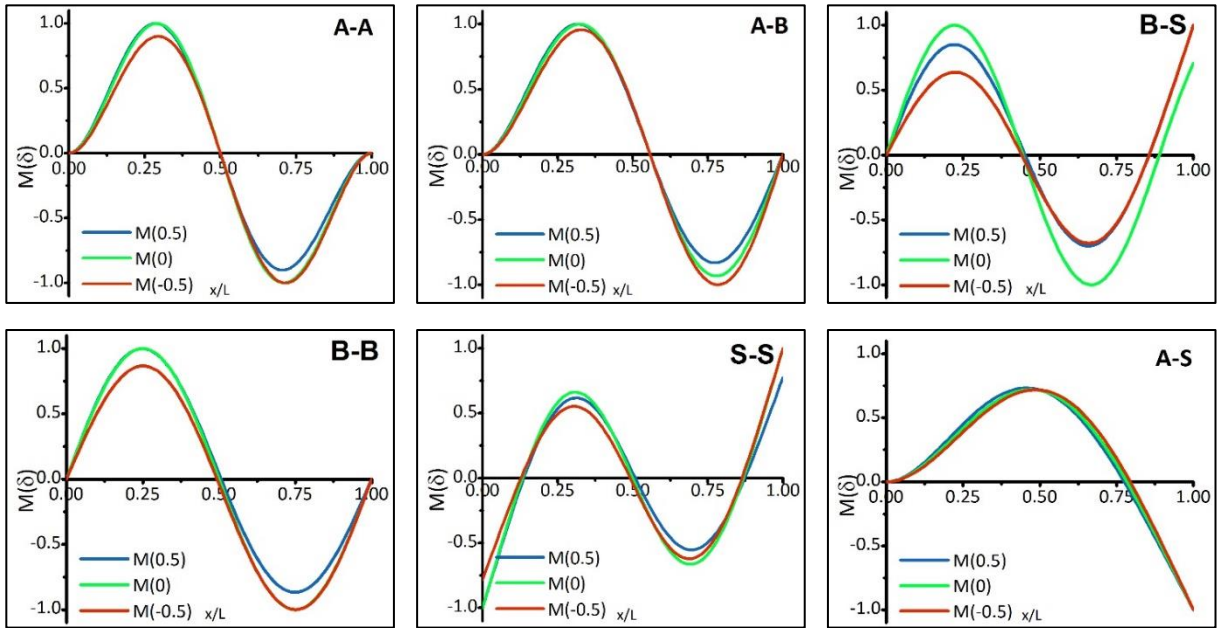
Sınır Koşulu	x/L	1. Mod			2. Mod			5. Mod			8. Mod		
		M(0,5)	M(0)	M(-0,5)	M(0,5)	M(0)	M(-0,5)	M(0,5)	M(0)	M(-0,5)	M(0,5)	M(0)	M(-0,5)
AA	0,00	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
	0,25	0,77834	0,82909	0,93222	1,35515	1,44373	1,53559	-0,49544	-0,52789	-0,56140	-0,50751	-0,53994	-0,57508
	0,50	1,42551	1,61505	1,82750	0,00191	0,00000	0,00245	1,24822	1,41457	1,60275	-0,00068	0,00000	-0,00087
	0,75	0,77150	0,92746	1,06089	-1,19689	-1,44373	-1,74147	-0,43897	-0,52789	-0,63870	0,44670	0,53994	0,64995
	1,00	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
AB	0,00	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
	0,25	0,60747	0,64971	0,68835	1,26370	1,34669	1,43196	-0,24349	-0,25971	-0,27591	-0,73690	-0,78416	-0,83502
	0,50	1,26875	1,44373	1,62911	0,50492	0,57035	0,64833	1,15274	1,30683	1,48015	-0,47822	-0,54119	-0,61405
	0,75	1,00932	1,22054	1,46856	-1,14381	-1,38220	-1,66423	-0,97560	-1,17587	-1,41949	-0,22970	-0,27590	-0,33421
	1,00	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
AS	0,00	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
	0,25	0,28486	0,26505	0,24184	0,76242	0,81939	0,87534	0,54673	0,58159	0,61953	-1,22739	-1,30648	-1,39082
	0,50	0,95447	0,92501	0,87950	1,21396	1,40145	1,61127	-0,02057	-0,02202	-0,02655	-1,24790	-1,41414	-1,60233
	0,75	1,78876	1,79199	1,76385	0,16447	0,26507	0,40663	-0,39428	-0,47970	-0,57870	-1,07817	-1,30101	-1,56845
	1,00	2,65665	2,72444	2,74864	-1,69374	-1,96374	-2,24576	1,55724	1,93179	2,38549	-1,55747	-1,95955	-2,45878
BB	0,00	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
	0,25	0,63917	0,70711	0,78072	0,94717	1,00000	1,05507	-0,65323	-0,70711	-0,76485	-0,00953	0,00000	0,01034
	0,50	0,88042	1,00000	1,13138	0,03904	0,00000	-0,04789	0,88248	1,00000	1,13317	-0,00924	0,00000	0,01068
	0,75	0,60649	0,70711	0,81983	-0,82120	-1,00000	-1,21596	-0,59654	-0,70711	-0,84010	-0,00892	0,00000	0,01097
	1,00	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
BS	0,00	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
	0,25	0,73699	0,83142	0,87479	0,93672	0,98079	1,03288	-0,77282	-0,83147	-0,89419	0,17420	0,19509	0,21751
	0,50	0,74862	0,92395	0,93791	-0,28762	-0,38268	-0,45271	0,82051	0,92388	1,04045	0,32944	0,38268	0,44321
	0,75	-0,02539	0,19538	-0,04758	-0,59883	-0,83147	-0,86695	-0,18477	-0,19509	-0,23136	0,45429	0,55557	0,68024
	1,00	-1,12177	-0,70683	-1,55470	1,12142	0,70711	1,64840	-1,10723	-0,70711	-1,74619	1,10580	0,70711	1,77001
SS	0,00	-2,28738	-2,03562	-1,84250	-2,13648	-1,99845	-1,88077	-2,06004	-2,00000	-1,94415	-2,03834	-2,00000	-1,96341
	0,25	0,09324	0,20192	0,29705	1,14572	1,16859	1,19370	-0,49898	-0,55450	-0,61266	-0,54300	-0,54246	-0,54161
	0,50	1,22077	1,23729	1,26312	0,08920	0,00000	-0,09648	1,28475	1,41386	1,55692	-0,02450	0,00000	0,02861
	0,75	0,29254	0,20192	0,10287	-1,05765	-1,16859	-1,29761	-0,50733	-0,55450	-0,60711	0,43670	0,54246	0,66993
	1,00	-1,77433	-2,03562	-2,35823	1,65861	1,99845	2,40822	-1,60172	-2,00000	-2,49246	1,58577	2,00000	2,51840

**Tablo 3.** Tüm sınır koşullarının ilk on mod için doğal frekans değerleri

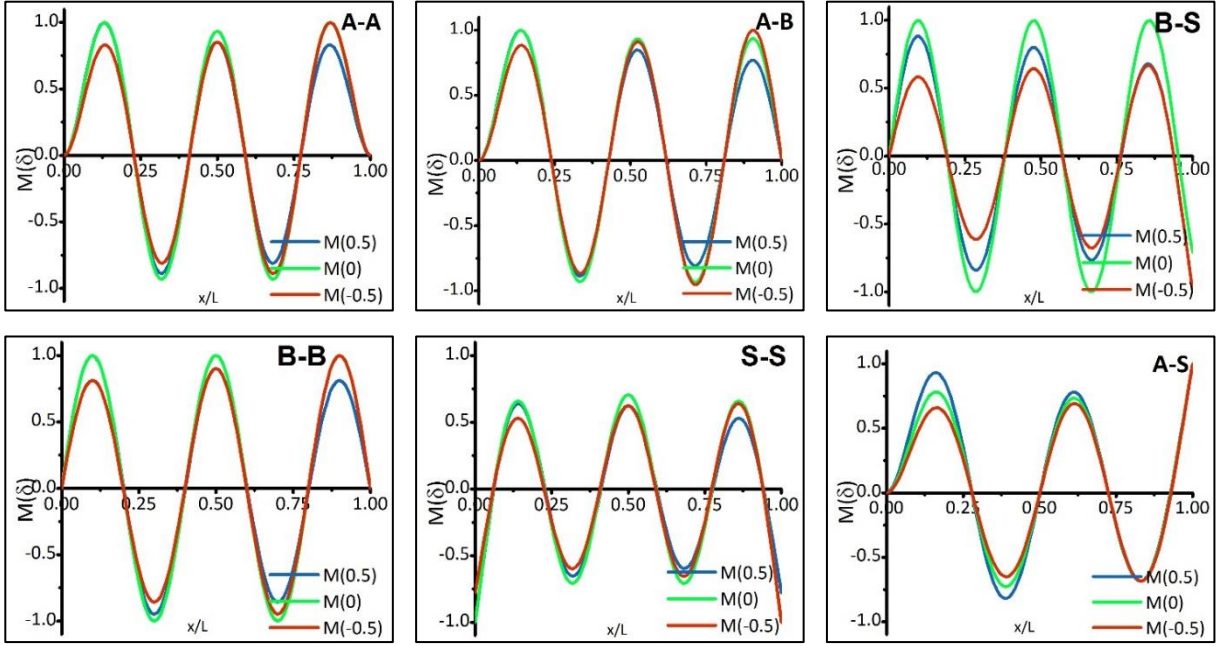
Sınır Koşulu	$\delta$	1.mod	2.mod	3.mod	4.mod	5.mod	6.mod	7.mod	8.mod	9.mod	10.mod	
AA	0	0	22,373285	61,672823	120,903390	199,859450	298,555540	416,990790	555,165250	713,078920	890,731800	1088,123900
	0,5	0,5	22,407711	61,719503	120,954525	199,913109	298,610802	417,047165	555,222443	713,136737	890,790109	1088,182600
	1	1	22,511682	61,859697	121,107980	200,074120	298,776620	417,216310	555,394040	713,310200	890,965050	1088,358700
	-0,5	-0,5	22,407711	61,719503	120,954520	199,913110	298,610800	417,047170	555,222440	713,136740	890,790110	1088,182600
	-1	-1	22,511682	61,859697	121,107980	200,074120	298,776620	417,216310	555,394040	713,310200	890,965050	1088,358700
AB	0	0	15,418206	49,964862	104,247700	178,269730	272,030970	385,531420	518,771080	671,749950	844,468030	1036,925300
	0,5	0,5	14,894929	49,500827	103,791196	177,817860	271,581893	385,084226	518,325242	671,305133	844,024009	1036,481940
	1	1	14,378288	49,106280	103,421940	177,462370	271,234750	384,742710	517,987780	670,970730	843,692000	1036,151800
	-0,5	-0,5	15,954595	50,498568	104,791280	178,817820	272,581860	386,084200	519,325220	672,305110	845,023990	1037,481900
	-1	-1	16,511491	51,102631	105,422000	179,462070	273,234480	386,742480	519,987590	672,970570	845,691860	1038,151700
AS	0	0	3,516015	22,034492	61,697214	120,901920	199,859530	298,555530	416,990790	555,165250	713,078920	890,731800
	0,5	0,5	3,009784	21,017704	60,741347	119,950981	198,911997	297,610004	416,046600	554,222020	712,136409	889,789847
	1	1	2,565342	20,038379	59,870849	119,098630	198,069640	296,773610	415,214190	553,392450	711,308980	888,964070
	-0,5	-0,5	4,089328	23,094053	62,738229	121,950990	200,911880	299,609920	418,046530	556,221970	714,136360	891,789810
	-1	-1	4,734907	24,201813	63,864490	123,097910	202,068770	300,772930	419,213650	557,392020	715,308620	892,963780
BB	0	0	9,869604	39,478418	88,826440	157,913670	246,740110	355,305760	483,610620	631,654680	799,437960	986,960440
	0,5	0,5	9,845362	39,501309	88,862422	157,956282	246,786698	355,354997	483,661749	631,707235	799,491615	987,014983
	1	1	9,772910	39,570366	88,970523	158,084190	246,926500	355,502740	483,815160	631,864910	799,652600	987,178620
	-0,5	-0,5	9,845362	39,501309	88,862422	157,956280	246,786700	355,355000	483,661750	631,707240	799,491620	987,014980
	-1	-1	9,772910	39,570366	88,970523	158,084190	246,926500	355,502740	483,815160	631,864910	799,652600	987,178620
BS	0	0	15,418206	49,964862	104,247700	178,269730	272,030970	385,531420	518,771080	671,749950	844,468030	1036,925300
	0,5	0,5	14,894929	49,500827	103,791196	177,817860	271,581893	385,084226	518,325242	671,305133	844,024009	1036,481940
	1	1	14,378288	49,106280	103,421940	177,462370	271,234750	384,742710	517,987780	670,970730	843,692000	1036,151800
	-0,5	-0,5	15,954595	50,498568	104,791280	178,817820	272,581860	386,084200	519,325220	672,305110	845,023990	1037,481900
	-1	-1	16,511491	51,102631	105,422000	179,462070	273,234480	386,742480	519,987590	672,970570	845,691860	1038,151700
SS	0	0	21,502593	61,764887	120,895860	199,859970	298,555500	416,990790	555,165250	713,078920	890,731800	1088,123900
	0,5	0,5	21,683944	61,930980	121,063047	200,027103	298,722639	417,157927	555,332389	713,246060	890,898940	1088,291030
	1	1	22,224492	62,428704	121,564290	200,528300	299,223920	417,659250	555,833740	713,747430	891,400330	1088,792400
	-0,5	-0,5	21,683944	61,930980	121,063050	200,027100	298,722640	417,157930	555,332390	713,246060	890,898940	1088,291000
	-1	-1	22,224492	62,428704	121,564290	200,528300	299,223920	417,659250	555,833740	713,747430	891,400330	1088,792400



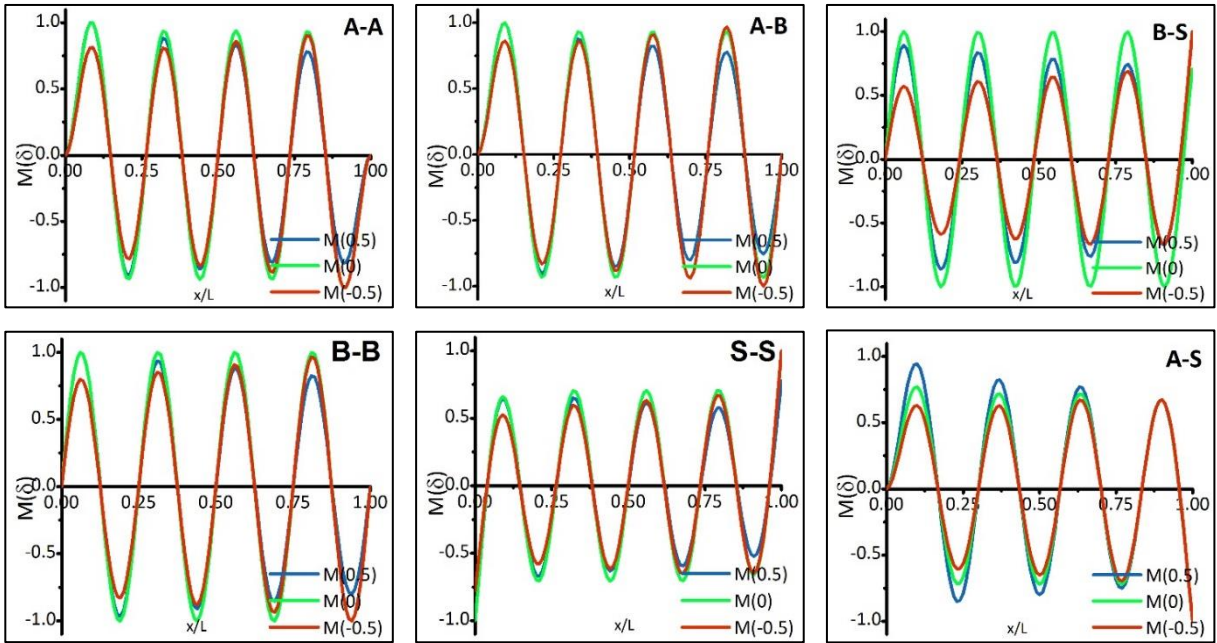
Şekil 4. Farklı eğrilik katsayıları için tüm sınır şartlarında normalize edilmiş mod şekilleri (1. mod)



Şekil 5. Farklı eğrilik katsayıları için tüm sınır şartlarında normalize edilmiş mod şekilleri (2. mod)



Şekil 6. Farklı eğrilik katsayıları için tüm sınır şartlarında normalize edilmiş mod şekilleri (5. mod)



Şekil 7. Farklı eğrilik katsayıları için tüm sınır şartlarında normalize edilmiş mod şekilleri (8. mod)



#### 4. Sonuç

Bu çalışmada değişken kesitli izotropik kirişler ele alınmıştır. Analizde Euler-Bernoulli Kiriş Teorisi kullanılmıştır. Kesit değişimi üstel olarak seçilmiştir. Kesit geometrisinden yararlanılarak yönetici denklemler belirlenmiş, bu denklemlerdeki katsayılar farklı sınır şartları için hesaplanmış ve sınır şartlarına ait titreşim değerleri hesaplanmıştır. Titreşim değerleri doğrultusunda sınır şartlarına ait birinci, ikinci, beşinci ve sekizinci mod şekilleri çizilmiştir. Bu veriler ışığında düzgün kesitli bir kirişin davranışına kıyasla sonuçlar elde edilmiştir.

Yapılan hesaplamalar sonucu sınır şartlarına ait elde edilen doğal frekanslar, daha önceden yapılmış çalışmaların sonuçlarıyla karşılaştırılmış ve sonuçların eski çalışmalardaki sonuçlarla uyum içerisinde olduğu görülmüştür (Gorman, 1975, Elishakoff., 2005, Ece, Aydoğdu ve Taşkın, 2007).

Kiriş eğiminin artan ya da azalan olması durumunun mod şekillerini etkilediği gözlemlenmiştir. Eğrilik katsayısının pozitif olduğu (kesit kalınlığının üstel olarak arttığı durumda) durumlarda mod şekillerindeki genliğin (yani titreşim değeri) arttığı, negatif olduğu (kesit kalınlığının üstel olarak azaldığı) durumlarda ise azaldığı görülmüştür. Bu çalışma diğer yapı elemanları için (örneğin plakalar, kabuklar) ya da kompozitler veya fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler için genişletilebilir.

#### Kaynaklar

İ.Varserin, “Kesidi Üstel Olarak Değişen Kirişlerin Serbest Titreşim Analizi” *Yüksek Lisans Tezi, Makine Mühendisliği Bölümü, Trakya Üniversitesi, Edirne, Türkiye*, 2015.

D.J. Gorman, *Free vibration analysis of beams and shafts*, 1. Baskı, New York, USA, Wiley, 1975.

E.T. Cranch, A.A. Adler, “Bending vibration of variable section beams”, *Journal of Applied Mechanics*, c. 23, s. 1, ss. 103–108, 1956.

H.D. Conway, J.F. Dobil, “Vibration frequencies of truncated-cone and wedge beams”, *Journal of Applied Mechanics*, c. 32, s.4, ss. 932–934, 1965.

A.C. Heidebrecht, “Vibration of non-uniform simply supported beams”, *Journal of the Engineering Mechanics Division*, c.93, s. 2, ss. 1–15, 1967.

R.M. Branch, “On the extremal fundamental frequencies of vibrating beams”, *Journal of Sound and Vibration*, c. 4, ss. 667–674, 1968.

H.H. Mabie, C.B. Rogers, “Transverse vibration of double-tapered cantilever beams”, *Journal of the Acoustical Society of America*, c. 51, s. 5, ss. 1771–1775, 1972.

C.D. Bailey, “Direct analytical solution to non-uniform beam problems”, *Journal of Sound and Vibration*, c. 56, s. 4, ss. 501–507, 1978.

N. Olhoff, R. Parbery, "Designing vibrating beams and rotating shafts for maximum difference between adjacent natural frequencies", *International Journal of Solids and Structures*, c. 20, ss. 63-75, 1984.

A.K. Gupta, “Vibration of tapered beams”, *Journal of Structural Engineering*, c. 111, s. 1, ss. 19–36, 1985.



R. Jategaonkar, D.S. Chehil, “Natural frequencies of a beam with varying section properties”, *Journal of Sound and Vibration*, c. 133, ss. 303–322, 1989.

S. Naguleswaran, “Vibration of an Euler–Bernoulli beam of constant depth and with linearly varying breadth”, *Journal of Sound and Vibration*, c. 153 s. 3, ss. 509–522, 1992.

- S. Naguleswaran, “A direct solution for the transverse vibration of Euler–Bernoulli wedge and cone beams”, *Journal of Sound and Vibration*, c. 172, s. 3, ss. 289–304, 1994a.
- Naguleswaran S. “Vibration in Two Principle Planes of a Non-uniform Beam of Rectangular Cross-Section, One Side of Which Varies as a Square Root of the Axial Coordinate”, *Journal of Sound and Vibration*, c. 172, s. 3, ss. 305-319, 1994b.
- P.A.A. Laura, R.H. Gutierrez, R.E. Rossi, “Free vibration of beams of bi-linearly varying thickness”, *Ocean Engineering*, c. 23, s. 1, ss. 1–6, 1996.
- A.K. Datta, S.N. Sil, “An analysis of free undamped vibration of beams of varying cross-section”, *Computers and Structures*, c. 59, s. 3, ss. 479–483, 1996.
- D.Caruntu, “On nonlinear vibration of non-uniform beam with rectangular cross-section and parabolic thickness variation”, *IUTAM / IFToMM Symposium on Synthesis of Nonlinear Dynamical Systems, Solid Mechanics and Its Applications*, London, ss. 109–118, 2000.
- I. Elishakoff, V. Johnson, “Apparently the first closed-form solution of vibrating inhomogeneous beam with a tip mass”, *Journal of Sound and Vibration*, c. 286, s. 4-5, ss. 1057–1066, 2005.
- S.K. Jang, C.W. Bert, “Free vibration of stepped beams”, Exact and numerical solutions. *Journal of Sound and Vibration*, c. 130, ss. 342–346, 1989a.
- S.K. Jang, C.W. Bert, “Free vibration of stepped beams: Higher mode frequencies and effects of steps on frequencies”, *Journal of Sound and Vibration*, c. 32, ss. 164–168, 1989b.
- I. Elishakoff, *Eigenvalues of inhomogeneous structures: unusual closed-form solutions*, CRC Press, Boca Raton, 2005.
- M.C. Ece, M. Aydoğdu, V. Taşkın, “Vibration of variable cross-section beam”, *Mechanics Research Communications*, c. 34, ss. 78-84, 2007.
- M. Aydogdu, S. Filiz, “Vibration Analysis of Piecewise and Continuously Axially Graded Rods and Beams”, *Mechanical Vibrations: Types, Testing and Analysis*, ss. 95-145, Nova Science Publishers, Inc. 2010.
- B. Akgöz, Ö. Civalek, “Free vibration analysis of axially functionally graded tapered Bernoulli–Euler microbeams based on the modified couple stress theory”, *Composite Structures*, c. 98, ss. 314–322, 2013.
- A. Mirzabeigy, “Semi-analytical Approach for Free Vibration Analysis of Variable Cross-section Beams Resting on Elastic Foundation and under Axial Force”, *IJE Transactions C: Aspects*, c. 27, ss. 385-394, 2014.
- F.F. Calim, “Transient analysis of axially functionally graded Timoshenko beams with variable cross-section”, *Composites Part B*, c. 98, ss. 472-483, 2016.
- B.H. Khaniki, S.H. Hashemi, “Free Vibration Analysis of Nonuniform Microbeams Based on Modified Couple Stress Theory: an Analytical Solution”, *IJE TRANSACTIONS B: Applications*, c. 30 ss. 311-320, 2017.
- F.F. Çalım, “Değişken Kesitli Timoshenko Kirişinin Serbest Titreşim Analizi”, *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, c. 6, s. 1, ss. 76-82, 2017.
- F. Sohani, H.R. Eipakchi, “Analytical solution for modal analysis of Euler- Bernoulli and

- Timoshenko beam with an arbitrary varying cross-section”, *Mathematical Models in Engineering*, c. 4, s. 3, 2018.
- S. Sınır, M. Çevik, B.G. Sınır, “Nonlinear free and forced vibration analyses of axially functionally graded Euler-Bernoulli beams with non-uniform cross-section”, *Composites Part B*, c. 148, ss. 123–131, 2018.
- E. Demir, “Longitudinal vibration of temperature dependent bar with variable cross-section”, *Politeknik Dergisi*, c. 21, s. 4, ss. 813-819, 2018.
- H. Lohar, A. Mitra, S. Sahoo, “Natural Frequency and Mode Shapes of Exponential Tapered AFG Beams on Elastic Foundation”, *International Frontier Science Letters*, c. 9, ss. 9-25, 2016.
- M. Soltani, B. Asgarian, “New hybrid approach for free vibration and stability analyses of axially functionally graded Euler-Bernoulli beams with variable cross-section resting on uniform Winkler-Pasternak foundation”, *Latin American Journal of Solids and Structures*, c. 16, s. 173, 2019.
- A. Ghannadiasl, “Natural frequencies of the elastically end restrained non-uniform Timoshenko beam using the power series method”, *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, c. 47, ss. 201-214, 2019.
- P.A. Demirhan, “Fonksiyonel Derecelendirilmiş Sandviç Kiriş Ve Plakların Dört Değişkenli Kayma Deformasyon Teorisi İle Eğilme Ve Titreşim Analizi”, *Doktora Tezi, Makine Mühendisliği Bölümü, Trakya Üniversitesi, Edirne, Türkiye*, 2016.
- X. Tong, B. Tabarrok, “Vibration analysis of Timoshenko beams with non-homogeneity and varying cross-section”. *Journal of Sound and Vibration*, c. 186 s. 5, ss. 821-835. 1995.

# ALÜMİNYUM KOMPOZİT KÖPÜK MALZEMELERDE TAKVİYE ORANINA BAĞLI OLARAK DARBE DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

Metecan ÖZEN<sup>1\*</sup>, Nilhan ÜRKMEZ TAŞKIN<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Trakya Üniversitesi, Edirne, TÜRKİYE

## Makale Künye Bilgisi:

Özen, M., Taşkın, N. Ü. (2021). Alüminyum Kompozit Köpük Malzemelerde Takviye Oranına Bağlı Olarak Darbe Davranışının İncelenmesi, *Trakya Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 22(2), 87-95.

## Öne Çıkanlar

- Yarı-katı köpürtme ile üretilmiş farklı Silisyum Karbür (SiC) takviye oranlarına sahip alüminyum köpük numunelerin, darbe test standardına uygun hazırlanması
- Farklı SiC takviye oranlarına sahip alüminyum köpüklerin yoğunluklarının belirlenmesi
- Farklı SiC takviye oranlarına sahip alüminyum köpük numunelerin darbe davranışlarının belirlenmesi

Makale Bilgileri	Öz
<b>Makale Tarihiçesi :</b> Geliş: 25 Aralık 2021 Kabul: 31 Aralık 2021	Alüminyum köpükler sahip oldukları düşük yoğunluk, yüksek enerji absorbe etme potansiyeli, ses ve alev sönmleme özellikleri nedeniyle birçok endüstriyel alanda kullanılmaya başlanmıştır. Bu malzemelerin mekanik ve fiziksel özelliklerinin geliştirilerek daha ekonomik yöntemlerle üretilebilmesi ve daha fazla alanda kullanılabilir hale gelmesi için yapılan çalışmalarda artış görülmektedir. Otomotiv, uçak ve uzay sanayii gibi teknolojik alanlarda alüminyum köpük malzemelerin hem yapısal hem de fonksiyonel olarak geleneksel malzemelerin yerini alması, bu malzemelerin mekanik davranışlarının tam olarak anlaşılması ve kontrol edilmesine bağlıdır. Seramik parçacık takviyesi ile gözenek yapısının ve dağılımının iyileştirildiği, üretime yönelik çalışmalar literatürde mevcut olmasına rağmen alüminyum kompozit köpüklerin darbe davranışlarını inceleyen çalışmaların sayısı oldukça azdır. Bu çalışmada farklı oranlarda SiC parçacıkları ile takviye edilmiş kompozit alüminyum köpük malzemeler çentik darbe testine tabi tutularak bu tür bir darbe karşısında enerji absorbe etme kabiliyetleri gözlemlenmiştir.
<b>Anahtar Kelimeler:</b> Alüminyum Köpük; Silisyum Karbür; Darbe Davranışı; Charpy Testi.	

## INVESTIGATION OF IMPACT BEHAVIOR OF ALUMINUM COMPOSITE FOAM MATERIALS DEPENDENT ON REINFORCEMENT RATIO

Article Info	Abstract
<b>Article History:</b> Received: December 25, 2021 Accepted: December 31, 2021	Aluminum foams have begun to be used in many industrial areas due to their low density, high energy absorptive potential, sound and flame damping features. Increased work has been done to improve the mechanical and physical properties of these materials, to produce them with more economical methods and to make them more usable in the field. The technological areas such as automotive, aircraft and space industry depend on the fact that aluminum foam materials, both structurally and functionally, replace traditional materials, and that the mechanical behavior of these materials is fully understood and controlled. The number of studies examining impact behaviors of aluminum composite foams are very low, although studies on production, which are improved with pore structure and distribution by ceramic particle reinforcement, are present in the literature. In this study, SiC reinforced aluminum foam materials were subjected to direct notch impact test at different ratios to observe the ability to absorb energy in the face of such impact.
<b>Keywords:</b> Aluminum Foam; Silicon Carbide; Impact Behavior; Charpy Test.	

## 1. Giriş

Metal köpük malzemeler, yüksek özgül dayanım, yüksek gaz geçirgenliği ve yüksek termal iletkenliğin bir arada olabildiği ileri teknoloji malzemeleridir. Yüksek oranda gözenekliliğe sahip metal köpük malzemeler bu özelliklerinden dolayı çeşitli mühendislik uygulamaları için yeni bir malzeme sınıfı olmuştur. Gözenekli metal yapılar için pek çok mevcut uygulamanın yanı sıra kimyasal süreçler için ısı değiştirgeci veya filtre olarak kullanılmaları ya da otomotiv uygulamalarında darbe enerji sönmüleyicisi olarak kullanılmaları gibi yeni uygulama alanları da oluşmaktadır. Ashby vs. (2000), metal köpükleri bu derece değerli kılan en önemli özelliklerinin hafif yapıları, nispeten yüksek dayanımları ve kendine özgü lineer olmayan deformasyon davranışları olduğunu ortaya koymuştur. Metal köpük malzemeler sahip oldukları bu özelliklere göre ses ve ısı yalıtımında, hafif yapılarda veya enerji sönmüleme gibi diğer alanlarda da kullanılabilirlerdir. Yu ve Banhart (1997), metal köpük malzemelerin, polimer köpük ve ağaçların kullanılmadığı özel ortam ve sıcaklıklar gerektiren mühendislik uygulamaları için olağanüstü avantajlar sunduğunu belirtmiştir.

Song ve Nutt (2007), 1948 yılında Benjamin Sosnick ergittiği alüminyum, civa ile köpürtmeye çalışmıştır. İlk olarak kapalı bir kaba koyduğu alüminyum ve civayı yüksek basınç değerlerinde eriterek karıştırmış, sonra basıncı ortadan kaldırarak civanın buharlaşması ile birlikte köpük üretimi gerçekleştirmiştir. 1950'li yıllarda yapılan çalışmalarda alüminyum ergiyiğinin içine bazı takviye malzemeleri ekleyerek sıvı fazdaki alüminyum metalinin mekanik özelliklerinde değişimler olduğu ve ayrıca daha kolay bir şekilde gözenek oluştuğu gözlemlenmiştir. O'Neill (2004), bu yıllarda William Elliott yaptığı çalışmalar ile alüminyum metalini köpürtme yöntemi geliştirmiştir. O zamanlarda kullanılan gaz enjeksiyonu ile köpük üretimi ve bir karıştırıcı yardımıyla ergiyiğe gaz salarak köpük üretme yöntemleri günümüzde de hala

kullanılmaktadır. Özer (2005), 1960'lı yıllarda mekanik özellikleri anlamında yüksek kaliteye sahip metal köpük malzemeler üretilmiştir. O dönemdeki enerji kaynakları, günümüzde olduğu kadar önemsenmeyip, sınırsız gözüyle bakıldığından bu tarz bir malzemeye olan ilgi azalmaya başlamış ve 1970'li yıllardan sonra metal köpük üretimi ile ilgili yapılan çalışmalar git gide azalmıştır. Banhart ve Weaire (2002), 1980-1990 yıllarında tekrardan metal köpük ile ilgili çalışmalar yapılmaya başlanmıştır. 1950'lerde geliştirilen toz metalurjisi ile köpük üretme yöntemi bu yıllarda yeniden gündeme gelmiş ve yöntem üzerinde çeşitli geliştirmeler yapılmıştır. Günümüzde ise tüm bu yöntemler ile birlikte farklı köpük üretim yöntemleri de geliştirilmeye devam etmektedir.

Günümüzde artık alüminyum köpük üreten firma sayısı ile birlikte kompozit metal köpüklerin kullanım alanlarında da artış olmaktadır. Ayrıca metal köpüklerin mekanik özelliklerini geliştirmek ve köpüğün üretim sürecini daha güvenilir hale getirmek için yapılan çalışmalar hızla artmaktadır.

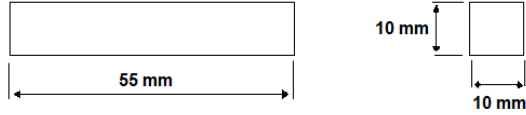
Kompozit alüminyum köpükler, alüminyum köpüklere nazaran çok daha homojen hücre dağılımına ve dayanımı yüksek hücre duvarlarına sahip olup, artan takviye oranlarıyla mekanik dayanım özellikleri değişmektedir. Bu çalışmada alüminyum köpük malzemelerin darbe davranışlarının araştırılması amacıyla üç farklı alaşımdan üretilen ve farklı oranlarda SiC takviyesi ile farklı yoğunluğa sahip kompozit alüminyum köpük malzemeler darbe testine maruz bırakılmış ve elde edilen sonuçlar irdelenmiştir.

## 2. Analiz

Bu bölüm üç kısımdan oluşmaktadır. İlk kısımda numunelerin hazırlanmıştır, ikinci kısımda bu numunelere ait yoğunluk ölçümleri yapılmıştır, üçüncü kısımda numunelere çentik darbe deneyi uygulanmıştır.

## 2.1. Numunelerin Hazırlanması

Yarı-katı köpürtme yöntemi ile üretilmiş olan, takviyesiz ve %0 ile %20 arasında değişen silisyum karbür takviye oranlarına sahip Al 5083, Al 5754 ve Al 7075 alaşımlı köpük numuneler alüminyum malzemeler için belirlenmiş olan ASTM E23 standartlarına uygun olarak hazırlanmıştır (Şekil 1).



Şekil 1. ASTM E23 standardı

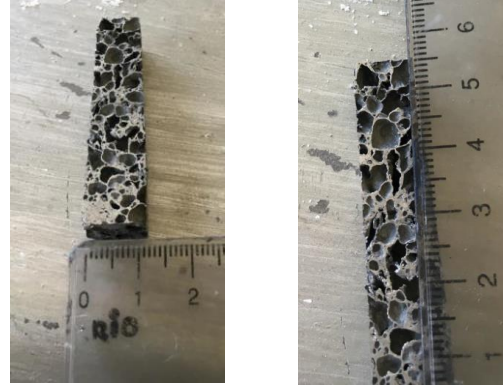
Her bir numuneden üçer adet olmak üzere numunelerin kesim işlemleri Metkon marka Microcut 200 model numune kesim cihazı ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 2).



Şekil 2. Metkon Microcut 200 kesim cihazı

Kesim işlemi sırasında diskin dönüş hızının kesilen numunenin cinsine göre ayarlanması gerekir. Alüminyum kompozit köpükler için, disk dönüş hızı malzemenin içerdiği takviye oranının artışı ile ters orantılı olacak şekilde düşmektedir. SiC katılmamış (takviyesiz) bir numunenin kesimi 120 rpm hız ile (dakikada 120 dönüş) gerçekleştirilirken, içinde %20 SiC olan bir numuneyi kesmek için dönüş ayarını 40 hatta 30, 20 rpm'lere kadar düşürmek gerekmektedir.

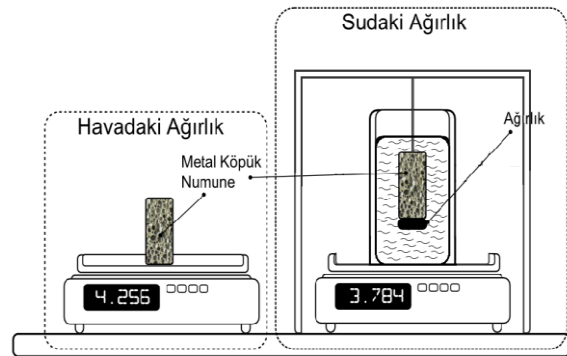
ASTM E23 standardına uygun olarak kesim işlemi yapılan numuneler Şekil 3'te gösterilmiştir



Şekil 3. Ölçülere uygun kesilmiş numuneler

## 2.2. Yoğunluk Ölçümü

Numunelerin yoğunluklarını hesaplamak için Arşimet Prensibinden yararlanılmıştır. Numunelerin havadaki ve sudaki ağırlıkları bir düzenek yardımıyla hesaplanmıştır (Şekil 4). Numunelerin yoğunluğu sudan hafif olduğu için ölçümler sırasında numunelerin suya batmasına yardımcı olacak bir ağırlık belirlenip, bu cismin sudaki ağırlığı hesaplanmıştır. Ardından numuneler bu cisim ile birlikte suya batırılmış ve böylelikle numunelerin sudaki ağırlıkları bulunmuştur.



Şekil 4. Arşimet prensibi ile yoğunluk ölçümü

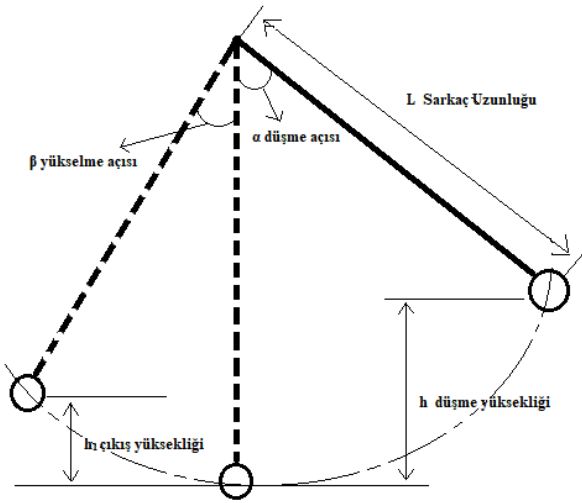
## 2.3. Çentik Darbe Deneyi

Gevrek malzemelerin çentik darbe deneyi için hazırlanan test numunelerine çentik açılmamaktadır.

Aynı durum metal köpük malzemeler için de geçerlidir. Sahip olduğu gözenekli yapı, malzeme üzerinde çentik etkisi göstermektedir. Bu sebeple köpük numunelerin darbe testlerinde çentik açılmamaktadır.

Numunelerin testleri Tubitak Marmara Araştırma Merkezi (MAM)'da bulunan Zwick marka masaüstü çentik darbe test cihazında, 7,5 Joule'lük çekiç ile yapılmıştır. Test sonuçlarına doğrudan etki edebilecek boyutta bir hava sürtünmesi olduğundan ilk olarak boş salınım gerçekleştirilerek hava sürtünme katsayısı 0,25 Joule olarak tespit edilmiştir.

Belirli bir  $h_0$  yüksekliğinde bulunan çekiç bu konumda  $G h_0$  enerjisine sahiptir. Serbest bırakılan sarkaç numuneye çarparak kırar ve  $h$  yüksekliğine çıkar. Bu konumda  $G h_1$  enerjisine sahip olur. Bu iki enerji arasındaki fark numunenin kırılması için gereken enerjiyi, başka bir deyişle darbe direncini gösterir (Şekil 5).



Şekil 5. Çentik darbe testinin şematik gösterimi

Köpüklerin darbe mukavemetlerini hesaplayabilmek için charpy darbe testi sırasındaki kırılma yüzey alanları hesaplanmıştır. Gözenekli bir yapıya sahip bu köpüklerin kesit alanlarını hesaplarırken alüminyum alaşımlarının yoğunluğu  $2,7 \text{ g/cm}^3$  olarak alınmış ve köpük malzemelerin kendi yoğunlukları ile alüminyum alaşımlarının yoğunluğu karşılaştırılarak

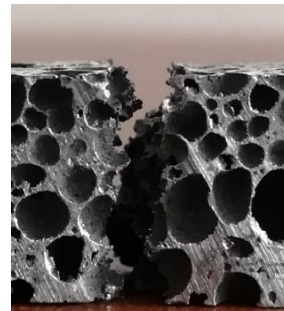
kesit alanındaki gözenek boşluklarının yüzdesi yaklaşık bir değerle hesaplanmıştır.

Örneğin;  $2,7 \text{ g/cm}^3$  yoğunluğa sahip alüminyum alaşımının kesit alanı %100'dür.  $0,703 \text{ g/cm}^3$  yoğunluğa sahip 1 no'lu takviyesiz Al 5083 alaşımli köpüğün kesit alanı ise yaklaşık %26'lık bir doluluğa sahip olup %74'ünü gözenek boşlukları oluşturmaktadır. Sonuç olarak kenar ölçülerinin çarpımının %26'sı 1 no'lu numunenin kesit alanı vermektedir.

### 3. Deneysel Bulgular ve Tartışma

Bu bölümde farklı oranlarda SiC takviyesine sahip üç farklı alüminyum alaşımı için yapılan darbe testi sonuçları incelenmiştir. Al 5754 alaşımına ait verilerde, darbe enerjilerinin diğer alüminyum alaşımlarına oranla daha fazla olduğu gözlemlenmektedir. Bu durumda Al 5754 alaşımı ile yapılmış olan SiC takviyeli köpükler, diğer alaşımlar ile yapılan köpüklere göre daha fazla enerji absorbe özelliğine sahip olduğu anlaşılmaktadır. Al 7075 alaşımlarına ait numunelerin test sonuçlarına bakıldığında, Al 5083 ve 5754 alaşımlarına ait numunelerin darbe enerjilerinin, Al 7075 alaşımına ait numunelerinkinden daha fazla olduğu görülmektedir.

Al 5083 alaşımli köpüklere ait özellikler ve test sonuçları Tablo 1'de gösterilmiştir. Çentik darbe testinin uygulanmış bir alüminyum köpük malzemede kırılma kesitinin fotoğrafı Şekil 6 da verilmiştir



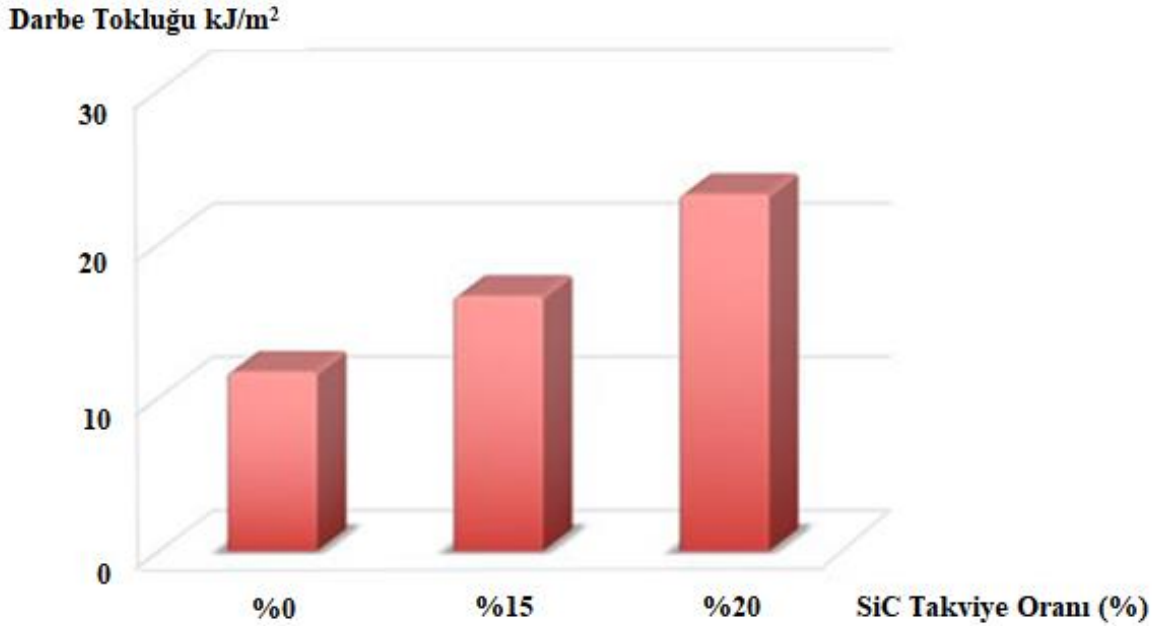
Şekil 6. Çentik darbe testinin uygulanmış bir alüminyum köpük malzemede kırılma kesiti

**Tablo 1.** Al 5083 alaşımlı numunelerin özellikleri ve deney sonuçları

Numune No.	SiC Takviye Oranı (%)	Yoğunluk, (g/cm <sup>3</sup> )	Kesit Alanı, (mm <sup>2</sup> )	Darbe Enerjisi, (Joule)	Darbe Tokluğu, (kJ/m <sup>2</sup> )
1	0	0.703	34.1642	0.45	13.1717
2	0	0.559	22.6832	0.25	11.0214
3	0	0.593	23.1217	0.25	10.8124
4	15	0.731	28.6949	0.55	19.1672
5	15	0.784	29.8941	0.50	16.7257
6	15	0.778	28.7807	0.40	13.8982
7	20	0.440	14.9053	0.35	23.4816
8	20	0.544	24.9170	0.60	24.0799
9	20	0.633	27.1139	0.60	22.1289

Takviyesiz ve %20 SiC takviyeli Al 5083 alaşımı köpükler ve absorbe ettikleri enerji miktarları incelendiğinde, genel olarak yoğunluk arttıkça absorbe edilen enerji miktarının da arttığı görülmüştür. %15 SiC takviyeli köpüklerde ise böyle bir sonuca varılamamıştır. Kırılma yüzeyleri incelendiğinde kırılma kesitindeki boşluk oranının fazla olduğu durumlarda köpük malzeme yoğunluğu fazla olsa bile o numunenin daha az enerji absorbe ederek kırıldığı gözlemlenmiştir.

%15 ve %20 SiC takviyeli Al 5083 alaşımlı köpükler ile takviyesiz Al 5083 alaşımlı köpüklerin darbe enerjileri 0,25-0,6 J değer aralığında değiştiği, darbe tokluklarının ise 10-25 kJ/m<sup>2</sup> değerleri arasında olduğu yapılan çalışmada ortaya konmuştur. Al 5083 alaşımlı köpüklerin darbe toklukları Şekil 7'deki grafikte gösterilmiştir.

**Şekil 7.** Farklı takviye oranlarına sahip Al 5083 alaşımlı köpüğün darbe tokluğu grafiği



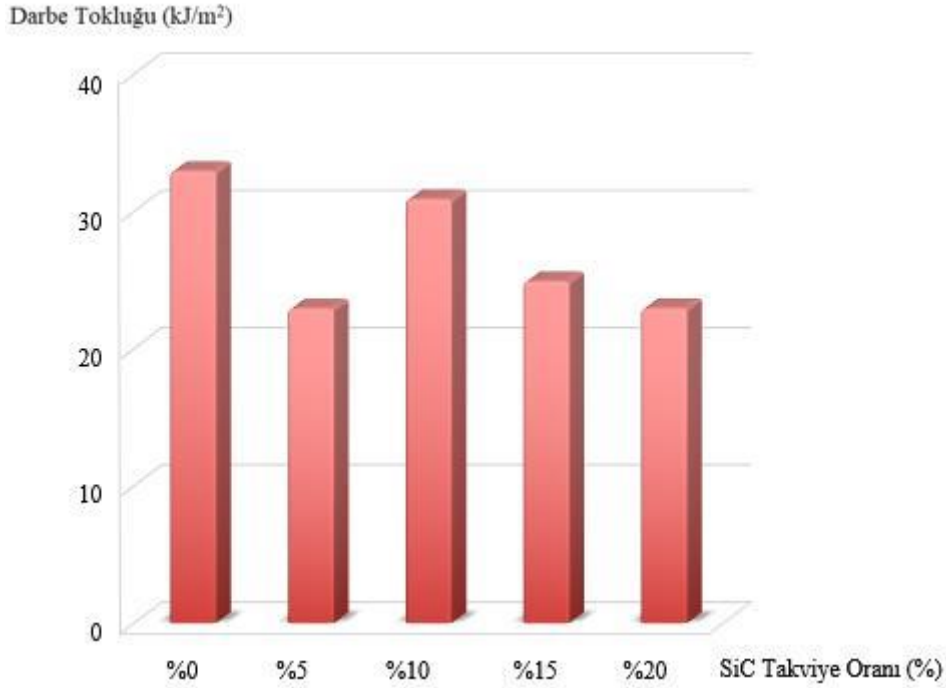
Al 5754 alaşımlı farklı takviye oranlarına sahip köpüklerin özellikleri ve test sonuçları Tablo 2’de gösterilmiştir.

**Tablo 2.** Al 5754 alaşımlı numunelerin özellikleri ve deney sonuçları

Numune No.	SiC Takviye Oranı (%)	Yoğunluk, (g/cm <sup>3</sup> )	Kesit Alanı, (mm <sup>2</sup> )	Darbe Enerjisi, (Joule)	Darbe Tokluğu, (kJ/m <sup>2</sup> )
10	0	0.886	38.8153	1.15	29.6275
11	0	0.958	47.1358	1.80	38.1875
12	0	0.811	33.8673	1.05	31.0034
13	5	0.662	25.8673	0.55	21.2624
14	5	0.891	35.4508	1.00	28.2081
15	5	0.664	31.0973	0.60	19.2943
16	10	0.642	24.5286	0.60	24.4612
17	10	0.573	23.1014	0.90	38.9587
18	10	0.495	17.0878	0.50	29.2606
19	15	0.735	30.1766	0.9	29.8244
20	15	0.643	22.5695	0.65	28.7999
21	15	0.625	21.7401	0.35	16.0993
22	20	0.633	25.1329	0.70	27.8519
23	20	0.721	29.2279	0.60	20.5283
24	20	0.612	24.4543	0.50	20.4463

Al 5754 alaşımı köpükler incelendiğinde benzer olarak yoğunluk arttıkça absorbe edilen enerji miktarının da arttığı görülmüştür. Yoğunluk olarak aynı numunenin hacmi içerisinde homojen gözenek boyut ve dağılımı çok hassas olarak sağlanamadığından dolayı kırılma olayı gözenek yoğunluğunun fazla olduğu kesitlerde gerçekleşmiştir. Örneğin; 16 nolu %10 SiC takviyeli numunenin yoğunluğu, 17 nolu numuneden daha fazla olmasına rağmen daha az enerji absorbe ederek kırılmıştır. Bunun sebebi 16 nolu numunenin kırılma kesitinde büyük gözenek boşluğu bulunmasından kaynaklandığı tespit edilmiştir.

%20’ye kadar SiC takviye oranlarına sahip Al 5754 alaşımlı köpük numunelerin darbe enerjileri 0,35-1,80 Joule arasında olduğu söylenebilmektedir. Darbe toklukları ise 16-38 kJ/m<sup>2</sup> aralığında değişkenlik gösterdiği sonucuna varılmaktadır. Al 5754 alaşımlı köpüklerin darbe tokluklarındaki dalgalanma Şekil 8’deki grafikte görülmektedir.



**Şekil 8.** Farklı takviye oranlarına sahip Al 5754 alaşımlı köpüğün darbe tokluğu grafiği

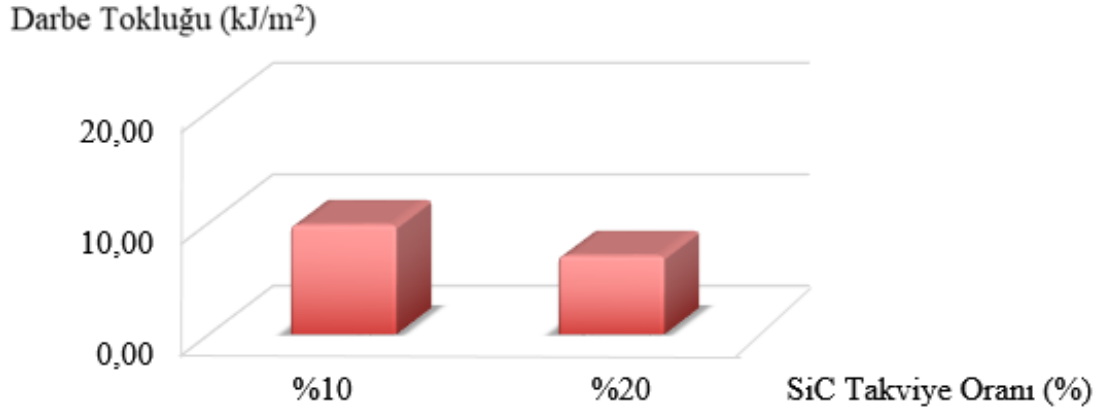
Al 7075 alaşımlı %10 ve %20 SiC takviye oranına sahip köpük numunelerin özellikleri ve test sonuçları Tablo 3'te gösterilmiştir

**Tablo 3.** Al 7075 alaşımlı numunelerin özellikleri ve deney sonuçları

Numune No.	SiC Takviye Oranı (%)	Yoğunluk, (g/cm <sup>3</sup> )	Kesit Alanı, (mm <sup>2</sup> )	Darbe Enerjisi, (Joule)	Darbe Tokluğu, (kJ/m <sup>2</sup> )
25	10	0.448	16.8237	0.20	11.8880
26	10	0.340	14.0935	0.10	7.0955
27	10	0.429	14.3197	0.15	10.4751
28	20	0.585	23.4522	0.15	6.3960
29	20	0.716	24.6861	0.20	8.1017
30	20	0.619	22.5377	0.15	6.6555

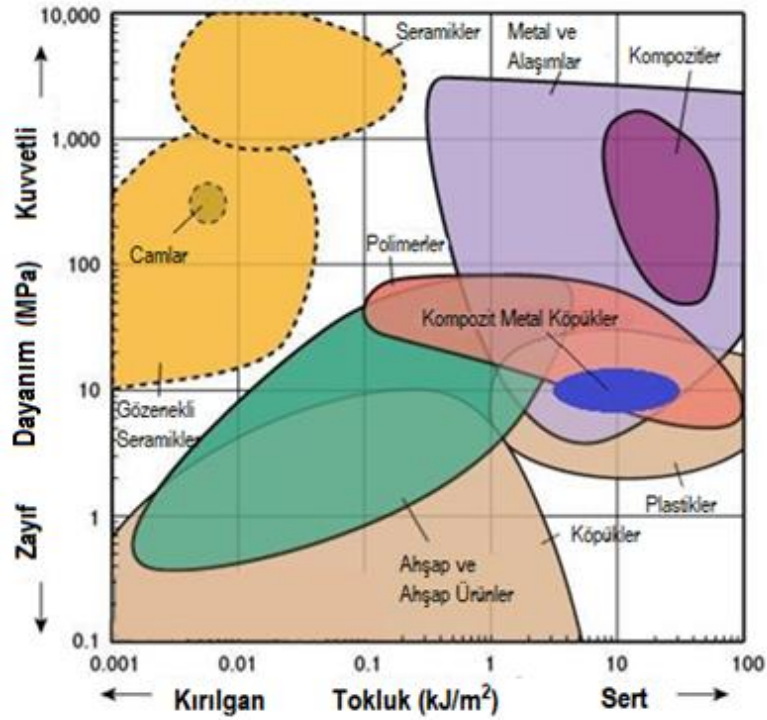
Al 7075 alaşımı köpükler incelendiğinde diğer alaşımlı köpüklerde olduğu gibi numune yoğunluğu arttıkça absorbe edilen enerji miktarının da arttığı görülmüştür.

%10 ve %20 oranlarında SiC takviyesine sahip Al 7075 alaşımlı köpüklerin darbe enerjileri 0,15-0,2 J'lük değer aralığında olup darbe toklukları ise 6-12 kJ/m<sup>2</sup> değerleri arasında değişkenlik göstermektedir. Şekil 9'deki grafikte Al 7075 alaşımlı köpüklerin darbe toklukları gösterilmiştir.



Şekil 9. Farklı takviye oranlarına sahip Al 7075 alaşımlı köpüğün darbe tokluğu grafiği

Bu çalışmadaki %20'ye kadar silisyum karbür takviye oranına sahip alüminyum köpüklerin darbe toklukları 6 – 39 kJ/m<sup>2</sup> değerleri arasındadır. Bu çalışmada kullanılan SiC takviyeli alüminyum köpüklerin basma dayanımları 8-20 MPa aralığındadır. Bu sonuçlar ile birlikte irdelendiğinde SiC takviyeli alüminyum kompozit köpük malzemelerin, farklı malzemeler arasındaki yeri Şekil 10'da gösterilmiştir.



Şekil 10. Kompozit metal köpüklerin dayanım-tokluk diyagramındaki yeri

#### 4. Sonuçlar

Al 5083, Al 5754 ve Al 7075 olmak üzere üç farklı alüminyum alaşımından doğrudan yarı-katı köpürtme yöntemi ile üretilen farklı takviye oranlarındaki

kompozit köpüklerden hazırlanmış numunelere charpy darbe testi uygulanarak absorbe ettikleri darbe enerjileri ölçülmüştür. Test sonucunda elde edilen bulgular aşağıdaki gibidir:

1. Farklı alüminyum alaşımından elde edilen tüm kompozit numunelere charpy darbe testi uygulanmış ve numunelerin enerji absorbe etme kabiliyetlerinin alaşımın karakteristiğine uygun olarak değiştiği görülmüştür. Metal alaşımının kimyasal yapısına bağlı olarak sünek veya gevrek olması, o alaşımdan üretilen köpük malzemelerin de kırılma esnasında aynı karakterde davranmasına neden olmaktadır.
2. Tüm alüminyum çeşitlerinde köpük yoğunluğunun artması ile kırılma için gereken darbe enerjisi artmıştır.
3. Yoğunluk olarak aynı olan numunelerde, numunenin hacmi içerisinde homojen gözenek boyut ve dağılımı çok hassas olarak sağlanamadığından, kırılma kesitindeki boşluk oranının fazla olmasından dolayı numunenin yoğunluğu fazla olsa bile daha az enerji absorbe ederek kırıldığı gözlemlenmiştir.
4. Darbe enerjisi, numunenin kırılma yüzeyindeki gözeneklilik oranına, takviye oranına ve alaşımın kimyasal bileşimine göre değişim göstermektedir. Al 5754 alaşımından üretilen köpükler 5083 ve 7075 alaşımından üretilen köpüklere göre daha fazla enerji absorbe ederek kırılmışlardır.
5. Çentik darbe numunelerinde takviye oranı arttıkça yapı içindeki gözeneklerin hemen hemen aynı boyuta geldiği ve homojen dağıldığı görülmüştür. Gözenek büyüklüklerinin hemen hemen eşit olduğu, aynı yoğunluğa sahip numunelerde silisyum karbür takviye oranı arttıkça darbe enerjisini arttığı da gözlemlenmiştir.
6. Deney sırasında kırılma kesitleri incelendiğinde kırılmanın büyük gözeneklerin olduğu kesitlerde gerçekleştiği, numune içindeki gözenek boyutlarının kırılma enerjisinin belirlenmesinde önemli ölçüde etkisi olduğu görülmüştür.

Alüminyum kompozit köpük malzemelerde takviye oranının artışı ile darbe enerjisinin değişiminin incelenmesinde numune içindeki



gözeneklerin yerleşimi de dahil olmak üzere çok fazla sayıda parametrenin etkili olduğu görülmüştür.

#### **Kaynaklar**

- Ashby, M.F., Evans, A.G., Fleck, N.A., Gibson, L.J., Hutchinson, J.W., Wadley H.N.G., Metal Foams: a design guide, *Materials and Design*, 23 (1), 119-251, 2000.
- Yu, C.J., Banhart, J., Mechanical properties of metallic foams, *Fraunhofer USA Metal Foam Symposium*, Delaware-USA, 37-48, 07-08 Ekim 1997.
- Song, Z., Nutt, S.R., Rheology of foaming aluminum melts, *Materials Science and Engineering*, 458 (2), 2007
- O'Neill, A.T., Development of closed cell metallic foam using casting techniques, Yüksek Lisans Tezi, North Carolina State University, North Carolina, 2004.
- Özer, G., Alüminyum esaslı köpük metal üretimi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Kimya-Metalurji Fakültesi, İstanbul, 2005.
- Banhart, J., Weaire, D., On the road again: metal foams find favor, *Phys. Today*, 55 (1), 37-42, 2002.



## FEM SIMULATION STUDY FOR A WELD SEAM DEFECT OF AN EXTRUDED PROFILE

Önder AYER<sup>1\*</sup> , İsmail KARAKAYA<sup>2</sup> 

<sup>1</sup>Trakya University, Department of Mechanical Engineering, Edirne, TURKEY

<sup>2</sup>eksenAL Aluminum Extrusion Die Factory, Istanbul, TURKEY

### Cite this article as:

Ayer, Ö., Karakaya, İ. (2021). FEM simulation study for a weld seam defect of an extruded profile, *Trakya University Journal of Engineering Sciences*.

### Highlights

- Finite element methods (FEM) give satisfactory and reliable results for complicated engineering problems.
- Extrusion defects could be predicted by using FEM-based software.
- FEM supported die design reduces both the total production cost and extrusion correction time.

### Article Info

#### Article History:

Received:  
December 29, 2021

Accepted:  
January 5, 2022

#### Keywords:

Porthole Extrusion Die Design;  
Weld Seam Formation;  
Aluminium Extrusion;  
Finite Element Method.

### Abstract

Aluminum material is an engineering material that is increasingly expanding its usage area today, thanks to its resistance to corrosion, strength and lightness. Various problems are encountered in the aluminum extrusion process. In the study, the predictability of weld seam formation defect during the design phase was investigated. By determining the process parameters, the weld seam lines in the product was investigated with the FEM-based HyperXtrude, and the real surface appearances of the product were compared with the FEM results. The results of the study provide satisfactory predictions for the porthole die design.

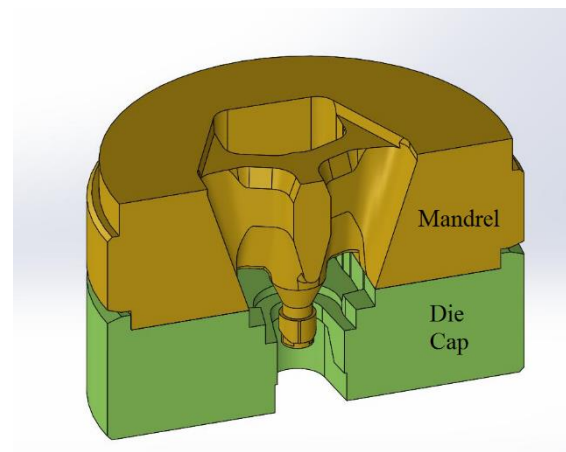
## 1. Introduction

Aluminum is an engineering material that is used in significant amounts thanks to its color, electrical conductivity, resistance to corrosion, strength, and lightness. Aluminum can be shaped by various methods such as casting, forging, and extrusion. (Lu et al., 2016) The hot extrusion method is the most common method used to produce profiles of different cross-sections and wall thicknesses from aluminum. (Edwards et al., 2009; Liu et al., 2018; Negendank et al., 2020; Vazdirvanidis et al., 2019) Especially, with the development of the industry, porthole dies are used to obtain profiles with large cross-section, various multi-cavities, and variable wall thicknesses. Porthole die design is of great importance to provide the optimum material flow, homogeneous temperature distribution and to reduce the amount of scrap for desired profile. (Liu et al., 2018) Such a die gives complex hollow sections to be extruded by splitting a billet into various metal steams that are rejoined inside to form longitudinal weld seams in the solid-state. (Edwards et al., 2009; Yu and Zhao, 2018). Well bonded weld seams are crucial when extruding hollow sections for load-bearing applications. (Yu et al., 2019, 2017) The design of a porthole die is directly related to the designer's talent and experience, trial and repair sequence and understanding the relationship between die structure and material flow. (Dong et al., 2016) That design procedure consumes so much time and energy and hence the computation methods and FEM-based software are getting attention both for reducing the total time and cycle and prediction of extrusion defects. Welding defect occurs for hollow sections and criteria for welding quality predictions are of great importance with the aim to optimize the die geometry design and extrusion parameters. (Fan et al., 2017) It is an undesirable extrusion defect since it causes structural damage when requiring mechanical strength.

In this study, FEM-based software HyperXtrude was used to simulate extrusion process and aimed to predict possible extrusion defect especially observing welding problem for an extruded profile. Weld seam formation is a complex problem for extrusion process and related with material properties, alloy composition, microstructure, process temperature and velocity. Therefore, it is not easy to predict the problem but HyperXtrude gives satisfactory estimations and accurate predictions for possible defects. The designer presents optimum die design by reading the FEM results.

## 2. Material and Methods

Four porthole extrusion die were used in the study. The portholes distribute the material flow balanced and provide an equal flow to the welding chamber. The porthole die setup was designed with SolidWorks software and then the 3D model was imported to the HyperXtrude software which is unique for extrusion analysis. The die setup was given in Figure 1. The process was simulated with FEM software for the strain, velocity, grain size distribution, and weld surface analysis.



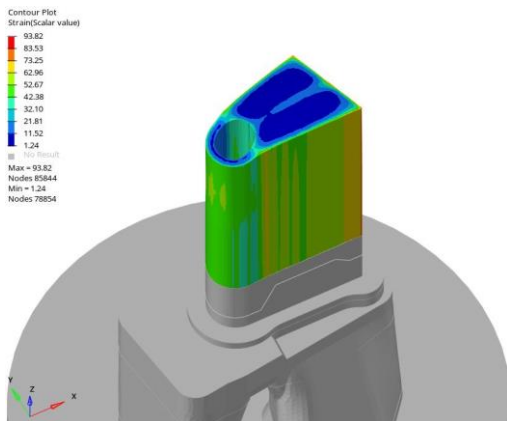
**Figure 1.** Die Setup

The simulation for the proposed model was carried out with a workstation with two Intel Xeon CPU (E5645)-2.40 GHz processors. The process parameters were selected as it is used in the extrusion

process. The process temperature was 460 °C, the punch velocity is 5 mm/sec, analysis type is direct, mesh size is selected as fine and mesh number is about 960,000. The analysis type is steady. The material was selected as AA6063. The selected profile has variable wall thickness and complex cross-section.

### 3. Results & Discussions

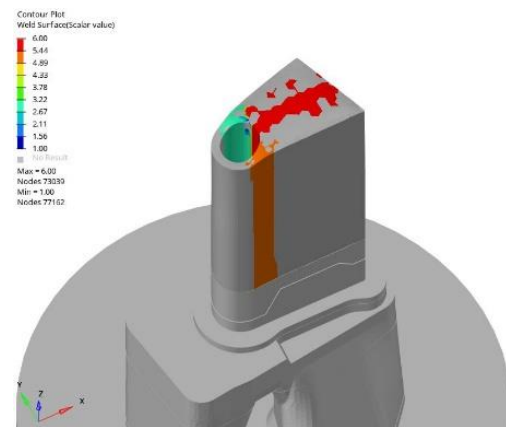
The Fem analysis was carried out to obtain a final profile of the extrusion product and predict whether there is a possible extrusion defect. For this purpose, the Fem model was results were analyzed. The strain distribution was given in Figure 2. It can be seen from the figure that higher deformation zone is on outer of profile. The higher deformation gives the higher strain values. Maximum strain value reaches 93.82 while the minimum was 1.24. The result clearly shows that the profile was divided into two different deformation zone. In the middle of the surface, a welding problem could be observed.



**Figure 2.** The strain distribution

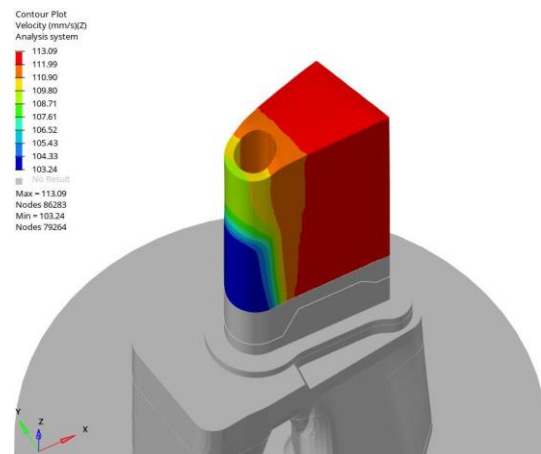
FEM result for weld surface was given in Figure 3. It is clearly observed that weld seam formation is located in the middle of the profile. The results are coherent with the strain distribution of the profile. The red region which value is around 6 provides the possible weld seam formation in the profile. It validates that weld seam formation may occur at the

center of the profile.



**Figure 3.** Weld Surface of the profile.

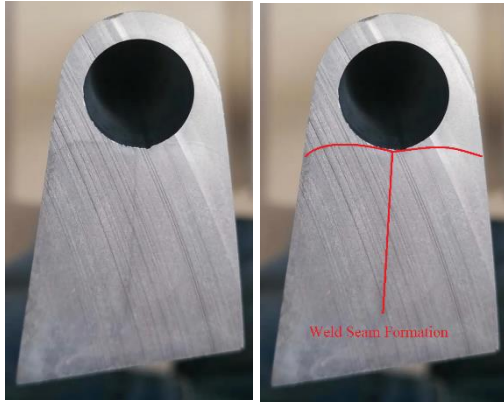
Figure 4 shows the exit velocity distribution for desired profile. Exit velocity is an important parameter for the quality of the product, especially investigating the extrusion defects. Punch velocity is selected as 5 mm/sec for the process and exit velocity value of the product reaches the 103-113 mm/sec range. It can be clearly seen from the figure that the velocity distribution is not homogenous hence it may cause extrusion defect. The die design should be reconsidered by taking this into account.



**Figure 4.** Exit velocity distribution of the product

In the Figure 5, the extruded profile could be seen. Weld seam formation could be observed on the surface by naked eye. The weld seam lines are so distinct and almost compatible with the FEM results.





**Figure 5.** Extruded profile and weld seam formation

#### 4. Conclusions

The study was aimed to predict weld seam formation for the direct extrusion with porthole die. It is concluded from the results that selected process parameters to cause the weld seam lines on the product. Hence, the die should be redesigned to obtain defect-free products. The strain is the key parameter for estimating the weld seams. Additionally, HyperXtrude software makes predictions for the weld seam formation zones and generally gives useful information to the designers. In this study, FEM results predicted the weld seam formation on the product. It can be concluded that the FEM is a useful tool for die design and reduces cost, time, and energy. The study could be extended to redesign the die set up and extrude profile.

#### References

- Dong, Y., Zhang, C., Luo, W., Yang, S., Zhao, G., (2016). Material flow analysis and extrusion die modifications for an irregular and multitooth aluminum alloy radiator. *Int. J. Adv. Manuf. Technology*, 85. 1927–1935.
- Edwards, S.P., Den Bakker, A.J., Zhou, J., Katgerman, L., (2009). Physical simulation of longitudinal weld seam formation during extrusion to produce hollow aluminum profiles. *Mater. Manuf. Process*. 24. 409–421.
- Fan, X., Chen, L., Chen, G., Zhao, G., Zhang, C., (2017). Joining of 1060/6063 aluminum alloys based on porthole die extrusion process. *J. Mater. Process. Technol.* 250. 65–72.
- Liu, Z., Li, L., Li, S., Yi, J., Wang, G., (2018). Simulation analysis of porthole die extrusion process and die structure modifications for an aluminum profile with high length-width ratio and small cavity. *Materials (Basel)*. 11. 1-20.
- Lu, X., Zhang, C., Zhao, G., Guan, Y., Chen, L., Gao, A., (2016). State-of-the-art of extrusion welding and proposal of a method to evaluate quantitatively welding quality during three-dimensional extrusion process. *Mater. Des.* 89. 737–748.
- Negendank, M., Sanabria, V., Reimers, W., Mueller, S., (2020). Numerical and experimental evaluation of an alternative mechanism for wall thickness variations of hollow profiles applying a porthole die. *Procedia Manuf.* 50. 79–85.
- Vazdirvanidis, A., Pressas, I., Papadopoulou, S., Toulfatzis, A., Rikos, A., Katsivarda, M., Symeonidis, G., Pantazopoulos, G., (2019). Examination of formability properties of 6063 alloy extruded profiles for the automotive industry. *Metals (Basel)*. 9. 1–25.
- Yu, J., Zhao, G., (2018). Interfacial structure and bonding mechanism of weld seams during porthole die extrusion of aluminum alloy profiles. *Mater. Charact.* 138. 56–66.
- Yu, J., Zhao, G., Cui, W., Chen, L., Chen, X., (2019). Evaluating the welding quality of longitudinal welds in a hollow profile manufactured by porthole die extrusion: Experiments and simulation. *J. Manuf. Process.* 38. 502–515.
- Yu, J., Zhao, G., Cui, W., Zhang, C., Chen, L., (2017). Microstructural evolution and mechanical properties of welding seams in aluminum alloy profiles extruded by a porthole die under different billet heating temperatures and extrusion speeds. *J. Mater. Process. Technol.* 247. 214–222.